



# Universidad de Cuenca

## Facultad de Ingeniería

### Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

---

## Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa

---

*Trabajo de titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero en  
Electrónica y Telecomunicaciones.*

---

#### **Autores :**

Juan Pablo Narváez Bernal C.I. 0301842647

Juan Bernardo Tenesaca Quilambaqui C.I. 0104857560

#### **Director :**

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD C.I. 0103907036

#### **Co-Director :**

Ing. Andrés Marcelo Vázquez Rodas, PhD C.I. 0301496840

---

Cuenca - Ecuador  
15 de Febrero de 2019





# Resumen

Las estaciones meteorológicas modernas, permiten el monitoreo en tiempo real de las variables atmosféricas. La arquitectura más usada en las Redes Inalámbricas de Sensores ([Wireless Sensor Network\(WSN\)](#)) se compone de nodos distribuidos en toda el área de interés, y de un *gateway* que es un intermediario entre los nodos y el servidor de red. Este servidor de red es el encargado de gestionar la red de dispositivos [Long Range Wide Area Network\(LoRaWAN\)](#), permitiendo así la presencia de múltiples *gateways* y la gestión centralizada de toda la red. Finalmente, el servidor central entrega los datos al usuario por medio de una aplicación.

En este trabajo, se utiliza como alternativa de [WSN](#), la tecnología de largo alcance y bajo consumo de energía [Long Range\(LoRa\)](#). Ésta se complementa con [LoRaWAN](#) para la comunicación de extremo a extremo. Dichas tecnologías han surgido con mucho ímpetu como una opción de soluciones de red dentro del paradigma de [Internet de las Cosas\(IoT\)](#). [LoRa](#) y [LoRaWAN](#) ofrecen varias ventajas para el desarrollo de sistemas de monitoreo en entornos rurales, debido a; su fácil configuración, bajo consumo energético y amplia cobertura. Por lo tanto, se convierten en las tecnologías adecuadas para cumplir con los propósitos del presente trabajo. Uno de los principales retos del presente trabajo es que la zona de interés del mismo solamente dispone de cobertura móvil de segunda generación. Esto implica que el *gateway* tiene como opción el uso de la tecnología [Global System for Mobile communications/ General Packet Radio Service \(GSM/GPRS\)](#) para subir los datos recopilados por los sensores. De tal modo que, se ha equipado al *gateway* con la tecnología [GSM/GPRS](#) para subir los datos al servidor.

La contribución principal del presente trabajo es la propuesta del protocolo de capa de aplicación [Variable Meteorological Transmission Protocol \(VMTP\)](#). Este protocolo propuesto se ejecuta sobre [LoRaWAN](#) y maneja las variables meteorológicas de interés. El protocolo es capaz de ajustar dinámicamente su carga útil en función de la información meteorológica que transporta. Esto con el fin de comprimir al máximo la trama enviada y por ende reducir el consumo energético global del sistema.

**Palabras clave :** [LoRa](#). [LoRaWAN](#). [IoT](#). [VMTP](#). [LoPy](#). **Protocolo**. **Variables Meteorológicas**. **Nodo**. *Gateway*. **Servidor**.







# Abstract

Modern weather stations allow real-time monitoring for atmospheric variables. The architecture most commonly used in the Wireless Sensor Networks [WSN](#) consists of nodes distributed through out the area of interest, and a gateway that is an intermediary between the nodes and the network server. This network server is responsible for managing the network of [LoRaWAN](#) devices, allowing the presence of multiple gateways and the centralized management of the entire network. Finally, the central server delivers the data to the user through an application.

In this work, it is used as an alternative of [WSN](#), the long-range technology and low power consumption [LoRa](#). Also, it is complemented with [LoRaWAN](#) for end-to-end communication. These technologies have emerged with great impetus as an option of network solutions within the [IoT](#) paradigm. [LoRa](#) and [LoRaWAN](#) offer several advantages for the development of monitoring systems in rural environments, due to; its easy configuration, low energy consumption and wide coverage. Therefore, they are the appropriate technologies to fulfill the purposes of this work. One of the main challenges of the present work is that the area of interest only has second generation mobile coverage. This implies that the gateway has as an option the use of technology [GSM/GPRS](#) to upload the data collected by the sensors. In such a way, the gateway with the technology [GSM/GPRS](#) has been equipped to upload the data to the server.

The main contribution of the present work is the proposal of the application layer protocol [VMTP](#). This proposed protocol runs on [LoRaWAN](#) and handles the meteorological variables of interest. The protocol is capable of adjust dynamically its payload based on the meteorological information it carries. This is in order to compress the maximum frame sent and as a consequence, reduce the energy consumption of the entire system.

**Keywords** : [LoRa](#). [LoRaWAN](#). [IoT](#). [VMTP](#). [LoPy](#). Protocol. Meteorological Variables. Node. Gateway. Server.





# Índice general

|  |           |
|--|-----------|
| Resumen  | III       |
| Abstract   | V         |
| Índice general   | VII       |
| Índice de figuras  | XI        |
| Índice de tablas   | XIII      |
| Abreviaciones y acrónimos  | XIX       |
| <b>1. Introducción</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1. Identificación del problema . . . . .   | 3         |
| 1.2. Justificación . . . . .   | 4         |
| 1.3. Alcance . . . . .   | 5         |
| 1.4. Objetivos . . . . .   | 6         |
| 1.4.1. Objetivo general . . . . .  | 6         |
| 1.4.2. Objetivos específicos . . . . .   | 6         |
| <b>2. Marco teórico y estado del arte</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1. Sensores de las estaciones meteorológicas del PROMAS . . . . .                    | 7         |
| 2.2. Tecnologías de comunicación disponibles . . . . .                                 | 8         |
| 2.2.1. Comunicación alámbrica . . . . .  | 8         |
| 2.2.2. Comunicación inalámbrica . . . . .  | 9         |
| 2.3. Activación de dispositivos finales . . . . .                                      | 10        |
| 2.4. Conclusiones . . . . .  | 11        |
| <b>3. Estado del Arte LoRa y Trabajos Relacionados</b>                                 | <b>13</b> |
| 3.1. Tecnología LoRa . . . . .   | 14        |
| 3.2. Trabajos relacionados en el monitoreo y transmisión de datos meteorológicos . . . | 14        |
| 3.3. Conclusiones . . . . .  | 17        |



|   |           |
|---|-----------|
| <b>4. Diseño e Implementación</b>                     | <b>19</b> |
| 4.1. Arquitectura de la red                           | 19        |
| 4.1.1. Nodo   | 20        |
| 4.1.2. <i>Gateway</i>                                 | 20        |
| 4.1.3. Servidor                                       | 22        |
| 4.2. Descripción de equipos                           | 25        |
| 4.3. Implementación de GSM/GPRS en el <i>gateway</i>  | 26        |
| 4.4. Definición del tamaño de las variables           | 26        |
| 4.4.1. Temperatura                                    | 27        |
| 4.4.2. Humedad  | 27        |
| 4.4.3. Velocidad del viento                           | 27        |
| 4.4.4. Dirección del viento                           | 27        |
| 4.4.5. Precipitación                                  | 27        |
| 4.4.6. Radiación ultravioleta                         | 27        |
| 4.4.7. Presión atmosférica                            | 28        |
| 4.4.8. Radiación solar                                | 28        |
| 4.5. Diseño del protocolo propuesto (VMTP)            | 30        |
| 4.5.1. Carga útil normal                              | 31        |
| 4.5.2. Carga útil corta                               | 31        |
| 4.5.3. Banderas de control                            | 32        |
| 4.5.4. Diseño de la trama del protocolo VMTP          | 32        |
| 4.6. Conclusiones                                     | 33        |
| <b>5. Pruebas y Discusión</b>                         | <b>35</b> |
| 5.1. Pruebas de conectividad                          | 35        |
| 5.2. Pruebas de transmisión                           | 37        |
| 5.2.1. Comparación de tramas en la capa de aplicación | 37        |
| 5.2.2. Comparación de tramas en la capa LoRaWAN       | 37        |
| 5.3. Consumo de datos                                 | 40        |
| 5.4. Consumo energético                               | 40        |
| 5.5. Conclusiones                                     | 41        |
| <b>6. Conclusiones y Recomendaciones</b>              | <b>43</b> |
| 6.1. Conclusiones                                     | 43        |
| 6.2. Recomendaciones                                  | 44        |
| 6.3. Trabajos futuros                                 | 44        |
| <b>A. Configuración de dispositivos</b>               | <b>47</b> |
| A.1. Instalación y configuración del servidor LoRaWAN | 47        |
| A.1.1. Instalación                                    | 47        |



|  |           |
|--|-----------|
| A.1.2. Configuración del servidor . . . . .  | 48        |
| A.2. Configuración del <i>gateway</i> . . . . .                                    | 49        |
| A.3. Configuración de la red LoRaWAN . . . . .                                     | 50        |
| A.4. Configuración de un perfil en LoRaWAN . . . . .                               | 53        |
| A.5. Configuración de activación de un nodo por personalización . . . . .          | 54        |
| <b>B. Desarrollo de la aplicación en el servidor</b>                               | <b>57</b> |
| B.1. Descripción de la aplicación . . . . .  | 57        |
| B.2. Decodificación de paquetes LoRaWAN . . . . .                                  | 58        |
| B.3. Decodificación de la carga útil de las variables meteorológicas . . . . .     | 59        |
| B.3.1. Función para decodificar la marca de tiempo . . . . .                       | 59        |
| B.3.2. Función para decodificar las variables meteorológicas . . . . .             | 59        |
| B.3.3. Función para visualizar las variables meteorológicas . . . . .              | 60        |
| <b>C. Funciones de la implementación del GPRS SIM 900 con el <i>gateway</i></b>    | <b>63</b> |
| C.1. Función para inicializar el módulo GPRS SIM 900 . . . . .                     | 63        |
| C.2. Función para configurar el servidor NTP con el módulo GPRS SIM 900 . . . . .  | 64        |
| C.3. Función para conectar el módulo GPRS SIM 900 con la operadora móvil . . . . . | 65        |
| C.3.1. Función para enviar comandos . . . . .                                      | 66        |
| C.3.2. Función para enviar mensajes . . . . .                                      | 66        |
| C.4. Conexión UDP usando comandos AT . . . . .                                     | 67        |
| C.5. Conexión con el servidor NTP usando comandos AT . . . . .                     | 69        |
| C.5.1. Activación del perfil del portador . . . . .                                | 69        |
| C.5.2. Definición de parámetros NTP y obtención del tiempo de red . . . . .        | 69        |
| C.5.3. Desactivación el perfil del portador . . . . .                              | 69        |
| <b>D. Características del hardware</b>   | <b>71</b> |
| D.1. Módulo LoPy . . . . .   | 71        |
| D.2. Expansion Board . . . . .   | 72        |
| D.3. Módulo GSM/GPRS SIM900 . . . . .  | 73        |
| <b>Bibliografía</b>  | <b>75</b> |





# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Pila de comunicación <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .  | 4  |
| 1.2. Esquema general del sistema completo. . . . .   | 6  |
| 2.1. Arquitectura general de <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .   | 9  |
| 4.1. Arquitectura de la red con el uso de <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .  | 20 |
| 4.2. Diagrama de flujo del nodo ( <a href="#">Activation by Personalization(ABP)</a> ) . . . . .   | 21 |
| 4.3. Proceso de agregación de nodos. . . . .   | 22 |
| 4.4. Capas del protocolo <a href="#">VMTP</a> : capas del nodo, capas del <i>gateway</i> y capas del servidor. . . . .   | 23 |
| 4.5. Diagrama de flujo del <i>gateway</i> . . . . .  | 24 |
| 4.6. Módulo LoPy . . . . .   | 25 |
| 4.7. <i>Expansion Board</i> 2.0 . . . . .  | 25 |
| 4.8. Módulo <a href="#">GSM/GPRS</a> SIM900 . . . . .  | 26 |
| 4.9. Carga útil normal. . . . .  | 31 |
| 4.10. Carga útil corta. . . . .  | 31 |
| 4.11. Modelo de la trama normal del protocolo <a href="#">VMTP</a> . . . . .   | 32 |
| 4.12. Modelo de la trama corta del protocolo <a href="#">VMTP</a> . . . . .  | 32 |
| 5.1. Programa del servidor . . . . .   | 36 |
| 5.2. Promedio y desviación estándar de las diferentes configuraciones <a href="#">VMTP</a> y Cayenne en la capa de aplicación. . . . .                         | 38 |
| 5.3. Total de bytes enviados usando las diferentes configuraciones <a href="#">VMTP</a> y Cayenne en la capa de aplicación. . . . .                            | 38 |
| 5.4. Promedio y desviación estándar de las diferentes configuraciones <a href="#">VMTP</a> y Cayenne en la capa <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .              | 39 |
| 5.5. Total de bytes enviados usando las diferentes configuraciones <a href="#">VMTP</a> y <a href="#">LoRaWAN</a> en la capa <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . . | 39 |
| 5.6. Corriente total consumida de las distintas configuraciones <a href="#">VMTP</a> y Cayenne. . . . .  | 41 |
| A.1. Principales componentes del servidor <a href="#">LoRaWAN</a> [1]. . . . .   | 47 |
| A.2. Servidor <a href="#">LoRaWAN</a> en ejecución. . . . .  | 48 |



|  |    |
|--|----|
| A.3. Creación de un <i>gateway</i> en el servidor. . . . .   | 49 |
| A.4. Configuración de un <i>gateway</i> en el servidor. . . . .                                      | 50 |
| A.5. Configuración de la sección general de una red <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .                | 51 |
| A.6. Configuración de la sección ADR de una red <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .                    | 52 |
| A.7. Configuración de la sección <i>channels</i> de una red <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .        | 52 |
| A.8. Configuración de la sección general de un perfil <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .              | 53 |
| A.9. Configuración de la sección ADR de un perfil <a href="#">LoRaWAN</a> . . . . .                  | 54 |
| A.10. Configuración de activación de un nodo por personalización . . . . .                           | 55 |
|  |    |
| B.1. Aplicación en el servidor. . . . .  | 57 |
| B.2. Diagrama de flujo: función de la decodificación de la marca de tiempo. . . . .                  | 60 |
| B.3. Diagrama de flujo: función de la decodificación de las variables meteorológicas. . . . .        | 61 |
| B.4. Diagrama de flujo: función de visualización de las variables meteorológicas. . . . .            | 62 |
|  |    |
| C.1. Diagrama de flujo: función de inicialización el módulo GPRS SIM 900. . . . .                    | 64 |
| C.2. Diagrama de flujo: función de configuración del servidor NTP. . . . .                           | 65 |
| C.3. Diagrama de flujo: función para conectar el módulo GPRS SIM 900 con el <i>gateway</i> . . . . . | 66 |
| C.4. Diagrama de flujo: función para enviar comandos AT por el puerto serial. . . . .                | 67 |
| C.5. Diagrama de flujo: función para enviar mensajes por el puerto serial. . . . .                   | 67 |





# Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Características de las variables meteorológicas de la estación [2]. . . . .  | 8  |
| 2.2. Parámetros almacenadas en el dispositivo final . . . . .   | 10 |
| 4.1. Análisis a partir de los datos en el Ecuador, el mundo y <i>Davis Vantage Pro2 Plus</i> . (Datos originales) . . . . . | 29 |
| 4.2. Análisis a partir de la variación de los datos en <i>Davis Vantage Pro2 Plus</i> . . . .                               | 29 |



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Pablo Narváez Bernal en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de abril 2019

Juan Pablo Narváez Bernal

C.I: 0301842647



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Juan Bernardo Tenesaca Quilambaqui en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 16 de abril 2019

Juan Bernardo Tenesaca Quilambaqui

C.I: 0104857560



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Pablo Narvaez Bernal, autor del trabajo de titulación “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 16 de abril 2019

---

Juan Pablo Narvaez Bernal

C.I: 0301842647



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Juan Bernardo Tenesaca Quilambaqui, autor del trabajo de titulación “Diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología LoRa”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 16 de abril 2019

Juan Bernardo Tenesaca Quilambaqui

C.I: 0104857560



# Abreviaciones y Acrónimos

**ABP** Activation by Personalization. 7, 14, 32–35, 63

**AES** Advanced Encryption Standard. 14, 15, 51

**AppEUI** Application Identifier. 14, 15

**AppKey** Application Key. 15

**AppSKey** Application Session Key. 14, 15, 32

**DEET** Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. 4

**DevAddr** Device Address. 14, 15, 32

**DevEUI** Device Identifier. 15

**EIRP** Potencia Isotrópica Radiada Equivalente. 57, 59

**GSM/GPRS** Global System for Mobile communications/ General Packet Radio Service. 3, 5, 6, 16, 32, 33, 37–40, 51, 52, 83

**GWMP** Gateway Message Protocol. 29

. 19, 21

**IoT** *Internet de las Cosas*. 4, 5, 12, 13, 16, 17, 81

**IP** Internet Protocol. 12

**JSON** JavaScript Object Notation. 29, 30, 33

**LoRa** Long Range. 3–5, 7, 12, 16, 17, 29, 32, 33, 37, 38, 51, 81, 83

**LoRaWAN** Long Range Wide Area Network. 3–7, 12–14, 16, 17, 19, 28, 29, 32, 33, 38, 40, 41, 43, 44, 51, 52, 55–63, 65, 66, 83

**LPWAN** *Red de Área Extensa de Bajo Consumo Energético*. 12, 16, 17, 37, 38

**M2M** Machine to Machine. 38

**MAC** Media Access Control Layer. 3, 12, 14, 32, 40, 51, 57, 66, 67

**MIC** Message Integrity Code. 14

**NTP** Network Time Protocol. 33, 40, 74, 79

**NwkSKey** Network Session Key. 14, 15, 32



- OMM** Organización Meteorológica Mundial. [8](#)
- OTAA** Over The Air Activation. [7](#), [14](#), [15](#), [33](#)
- PROMAS** Programa para el Manejo del Agua y del Suelo. [3-5](#), [7](#), [9](#), [23](#), [65](#)
- SIM** Subscriber Identity Module. [32](#), [38](#), [52](#), [73](#), [75](#)
- SMS** Short Message Service. [5](#), [37](#)
- SMT** Surface Mount Technology. [84](#)
- TCP/IP** Transmission Control Protocol/Internet Protocol. [16](#), [84](#)
- UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter. [12](#)
- UDP** User Datagram Protocol. [29](#), [33](#), [40](#)
- ULP** Ultra Low Power. [82](#)
- USART** Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter. [12](#)
- VMTP** Variable Meteorological Transmission Protocol. [3](#), [19](#), [23](#), [27](#), [28](#), [31](#), [32](#), [39](#), [40](#), [42](#), [43](#), [45](#), [52](#)
- WiFi** Wireless Fidelity. [32](#), [37](#), [51](#), [81](#), [82](#)







# Capítulo 1

## Introducción

Este capítulo presenta la identificación del problema, justificación y los objetivos del presente proyecto.

### 1.1. Identificación del problema

La evolución de las comunicaciones inalámbricas han permitido el desarrollo de una variedad de aplicaciones, esto se debe a factores como: el despliegue de redes inalámbricas de sensores, nuevos métodos de compresión de datos, métodos eficaces de acceso al medio, nuevos protocolos de enrutamiento y estandarización de las tecnologías a nivel mundial [3]. Un ejemplo de aplicación real es el monitoreo ambiental, que permite la fiabilidad de la predicción del clima y el pronóstico del tiempo. Esto gracias, en gran medida, a la obtención y procesamiento en tiempo real de los datos [4].

Una de las instituciones que recolecta y usa datos meteorológicos es la Universidad de Cuenca a través del [Programa para el Manejo del Agua y del Suelo \(PROMAS\)](#). Este departamento de investigación tiene como parte de su misión, “contribuir al manejo sostenible de los recursos agua y suelo, usando nuevas tecnologías para alcanzar soluciones amigables con el ambiente y cumplir mejor sus objetivos científicos y de impacto social” [5]. En la actualidad, la información recolectada es usada para varios trabajos de investigación, un ejemplo concreto es el presentado en [6].

Por su parte, el proyecto “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba” tiene como principal objetivo el desarrollo de prototipos de registradores de datos (*dataloggers*) [7]. Una de las características fundamentales de dichos registradores es su capacidad de transmisión inalámbrica para las estaciones meteorológicas que dispone el [PROMAS](#). Los registradores son desarrollados usando la tarjeta de desarrollo LoPy [8]. Actualmente, la información de las estaciones meteorológicas es transmitida sin usar un protocolo de aplicación de extremo a extremo.

## 1.2. Justificación

Las redes de sensores inalámbricos (**WSN**) son sensores autónomos que monitorean parámetros físicos o ambientales que usualmente colaboran para transportar esa información hacia un servidor o al *gateway*. Este tipo de arquitectura de red se ha encontrado con restricciones tecnológicas actuales que no cumplen con los requerimientos energéticos ni de escalabilidad necesarios. Es por esto que han emergido nuevos protocolos y tecnologías como las Redes de Amplia Cobertura y Baja Potencia (*Red de Área Extensa de Bajo Consumo Energético*(**LPWAN**)). Esta tecnología permite desarrollar redes de área amplia y adaptar parámetros como la tasa de transmisión, potencia, modulación, etc, de tal manera que los dispositivos finales, llamados nodos sean eficientes en cuanto al consumo energético.

**LoRaWAN** es un protocolo de red de área extendida, de gran alcance y bajo consumo energético. Su objetivo es garantizar la interoperabilidad y flexibilidad de las diversas redes **LoRaWAN** integradas en el medio; permitiendo de esta manera, el soporte de múltiples aplicaciones tales como: nodos en una red inalámbrica alimentados por baterías en redes **IoT** [9]. **LoRaWAN** representa una nueva tendencia en la evolución en las telecomunicaciones [10], además utiliza los beneficios de la modulación **LoRa**.

**LoRa** es una tecnología de radio-frecuencia propietaria, se caracteriza por el uso eficiente de la energía con baterías que pueden durar hasta 10 años, cobertura con línea de vista de más de 10 km en entornos rurales, así como un rápido despliegue de red con nodos de bajo costo [11, 12]. Con estas características, estos nodos pueden por tanto, recolectar y transmitir información hidrometeorológica de sitios remotos en tiempo real.

La Figura 1.1 muestra la pila de protocolos de **LoRaWAN**. La técnica de modulación **LoRa** está ubicada en el nivel físico; mientras que LoRa MAC se define en la capa de Control de Acceso al Medio de LoRa (**LoRa Media Access Control Layer(MAC)**). Sobre esta última, está **LoRaWAN** que gestiona la comunicación de extremo a extremo, y permite brindar seguridad a nivel de capa de red y de aplicación.



Figura 1.1: Pila de comunicación **LoRaWAN**

En una red **LoRaWAN** clásica, los dispositivos finales denominados nodos se conectan y envían los datos a los *gateways*. Estos *gateways* retransmiten los datos de los nodos al servidor de red central usando conexión IP. Finalmente, el servidor central por medio de una aplicación

entrega los datos al usuario. Una característica de **LoRaWAN** es que los *gateways* son simples intermediarios entre los nodos y el servidor de red. Este servidor es el encargado de gestionar la red de dispositivos **LoRaWAN**, permitiendo así la presencia de múltiples *gateways* y la gestión centralizada de toda la red.

La tarjeta de desarrollo LoPy se presenta como una alternativa comercial para la implementación de aplicaciones usando la capa física **LoRa** [8]. Ésta ofrece una combinación óptima de potencia y flexibilidad para el desarrollo de aplicaciones **IoT** con fácil programación [13].

El **PROMAS** monitorea varios parámetros hidrometeorológicos tales como: temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, lluvia, presión barométrica y nivel de agua de los ríos. Para esto, se han desplegado alrededor de 130 estaciones meteorológicas en el Azuay, Cañar y Chimborazo.

Actualmente, en [7] está implementado un registrador de datos para estaciones que monitorean los niveles de agua, usando el microcontrolador LoPy con tecnología **LoRa**. Sin embargo, en el proyecto se considera un protocolo genérico en la capa de enlace de datos. Éste además, no dispone de un protocolo en la capa de red, y en la capa de aplicación se utiliza una trama sin fines de control o compresión de datos. Por este motivo, se plantea el diseño e implementación de un protocolo de capa de aplicación para la transmisión de datos hidrometeorológicos utilizando tecnología **LoRa**. Adicionalmente, se realiza la integración de **LoRaWAN** como capa de red, que permite el control del acceso al medio y añade características básicas de una capa de enlace de datos.

### 1.3. Alcance

La contribución de este trabajo se enfoca en el diseño e implementación del protocolo de capa de aplicación **Variable Meteorological Transmission Protocol (VMTP)**. **VMTP** trabaja sobre **LoRaWAN** y permite la comunicación de los nodos al *gateway* y este a su vez, retransmite los datos al servidor central. Este protocolo entre otras cosas, reduce considerablemente la cantidad de información a enviar desde los nodos. La codificación de **VMTP** es implementada en los módulos LoPy, así como su decodificación en el servidor central.

Otra de las contribuciones del presente trabajo, es realizar la configuración y uso del protocolo **LoRaWAN** en los módulos LoPy. **LoRaWAN** por su parte, permite realizar una comunicación de extremo a extremo entre los nodos sensores y el servidor.

La Figura 1.2, describe el esquema general del sistema desarrollado. Como se observa, se implementa una red **LoRaWAN** clásica donde la información de los nodos es transmitida al *gateway*, que a su vez reenvía los datos al servidor usando la tecnología **GSM/GPRS**. Como medida adicional, en el *gateway* se agregó el soporte para la tecnología **GSM/GPRS** a la implementación de **LoRaWAN**.

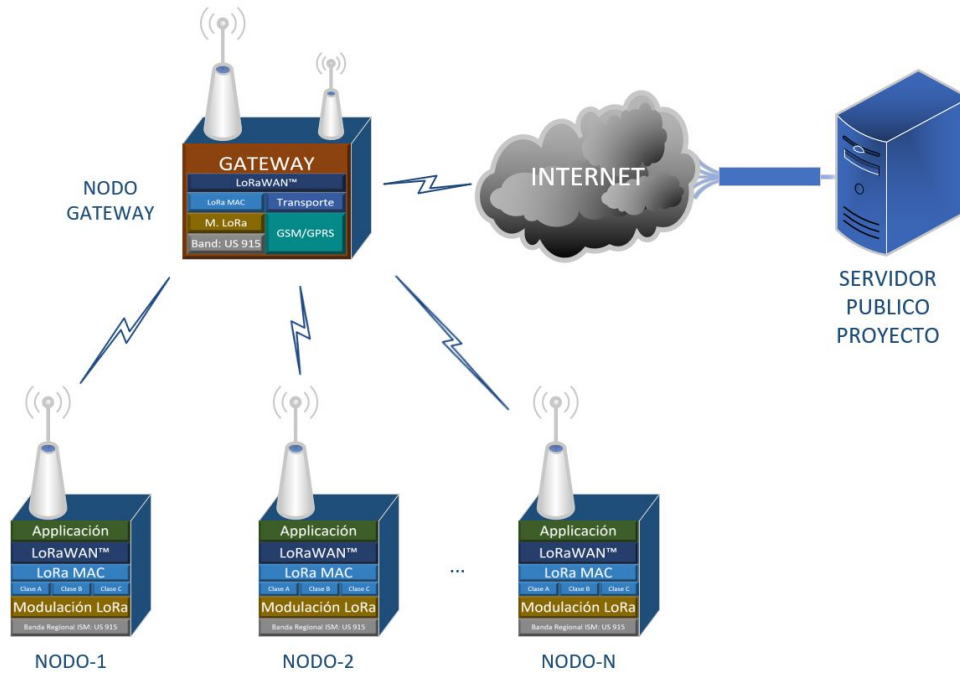


Figura 1.2: Esquema general del sistema completo.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo es el de diseñar e implementar un protocolo de capa de aplicación para el uso de sensores inalámbricos sobre [LoRaWAN](#), con el fin de transmitir parámetros hidrometeorológicos.

### 1.4.2. Objetivos específicos

El presente trabajo tiene los siguientes objetivos específicos:

- Hacer un análisis del estado del arte.
- Implementar el protocolo [LoRaWAN](#) en los módulos LoPy.
- Obtener los parámetros hidrometeorológicos.
- Realizar la compresión de los datos en el receptor previo a la transmisión con [GSM/GPRS](#).
- Acoplar el módulo [GSM/GPRS](#) al módulo LoPy que actúa como *gateway*.
- Realizar las pruebas de campo que permitan verificar la funcionalidad completa de toda la red.
- Realizar pruebas de campo que permitan optimizar el consumo energético de los nodos.

## Capítulo 2

# Marco teórico y estado del arte

El clima y los fenómenos meteorológicos han sido siempre factores importantes porque influyen directamente en gran parte de las actividades humanas. En [14] se menciona que el clima es lo que se espera; tiempo es lo que ocurre. El clima es la estadística del tiempo meteorológico promediado sobre un determinado período. Los cambios climáticos han permitido el desarrollo de la agricultura, la industria pesquera, el turismo y otras actividades [4]. Además, puede llegar a influir en la salud de personas debido a cambios moderados de las variables hidrometeorológicas.

En el presente trabajo, las variables específicas que se estudian son las que se obtienen de los sensores de la estación *DAVIS Vantage Pro2 Plus* que son: temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar, radiación ultravioleta y variables derivadas de las anteriores [2].

A continuación en este capítulo, se describe brevemente los sensores de las estaciones hidrometeorológicas del **PROMAS**. Luego, se analiza el estado actual de las tecnologías de comunicación tanto alámbricas como inalámbricas disponibles. Finalmente, se describe los tipos de activación de los dispositivos finales o nodos en la capa de aplicación.

### 2.1. Sensores de las estaciones meteorológicas del **PROMAS**

El **PROMAS** tiene estaciones meteorológicas comerciales con registradores de datos [15]. La estación consta de una consola que permite la descarga de datos y la interacción con el computador mediante el software *WeatherLink*. La estación tiene incluidos los siguientes sensores: pluviómetro, anemómetro, sensor de temperatura y humedad, sensor de radiación solar y sensor de radiación ultravioleta (UV). A continuación, se detalla brevemente las características fundamentales de cada sensor:

- **Pluviómetro:** usa un balancín que activa un interruptor de lengüeta magnético cada vez

que cambia de posición al volcarse el agua (tip). La resolución es de 0,01 pulgadas o 0,2 mm [2].

- **Anemómetro:** incluye los sensores de velocidad y dirección del viento usando un solo conector. Esta veleta está internamente conectada a un potenciómetro lineal de 20 k $\Omega$  [2].
- **Sensor de temperatura y humedad:** internamente cuenta con un circuito integrado SHT11 [2], el cual es un sensor digital de temperatura y humedad.
- **Sensor de radiación solar:** usa un fotodiodo de silicio de amplio espectro de respuesta con un amplificador que genera una salida de 0 a 3 V. La lectura de salida de este sensor tiene una equivalencia de 1,67 mV por W/m<sup>2</sup> [2].
- **Sensor de radiación UV:** su salida está en el rango de 0 a 2,5 V con una equivalencia de 150 mV por índice UV y 364 mV por MED/h [2].

La Tabla 2.1 resume varias características de las variables meteorológicas como: el intervalo de actualización, la resolución, el rango y el error de los datos medidos de forma directa por la estación. Éstas se obtienen mediante los sensores previamente descritos.

Tabla 2.1: Características de las variables meteorológicas de la estación [2].

| Variable            | Int. Actualización | Resolución         | Rango                       | Tolerancia       |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|
| Temperatura         | 10 a 12 seg        | 0.1°C              | -40° a 65°C                 | 3°C              |
| Humedad             | 50 seg a 1 min     | 1 %                | 0 % a 100 %                 | 4 % HR >90 %     |
| Velocidad de viento | 2.5 a 3 seg        | 1 km/hr<br>0.1 m/s | 3 a 371 km/hr<br>0 a 67 m/s | 3 km/hr<br>1 m/s |
| Dirección de viento | 2.5 a 3 seg        | 1°                 | 0° a 360°                   | 7°               |
| Radiación solar     | 50 seg a 1 min     | 1 W/m <sup>2</sup> | 0 a 1800 W/m <sup>2</sup>   | 5 % de escala    |
| Índice UV           | 50 seg a 1 min     | 0.1                | 0 a 20 puntos               | 5 % de escala    |
| Tasa de lluvia      | 20 a 24 seg        | 0.1 mm             | 0 a 1999.9 mm/hr            | 1 mm/hr          |
| Presión atmosférica | 50 seg a 1 min     | 0.1 mm Hg          | 660 a 810 mm Hg             | 0.8 mm Hg        |
|                     |                    | 0.1 mb             | 880 a 1080 mb               | 1 mb             |
|                     |                    | 0.1 hPa            | 880 a 1080 hPa              | 1 hPa            |

## 2.2. Tecnologías de comunicación disponibles

En la actualidad, la información se transmite mediante dos formas: alámbrica e inalámbrica. En el presente trabajo se usa la transmisión alámbrica para la comunicación del módulo LoPy con el módulo GPRS y la inalámbrica para la comunicación de los nodos y el *gateway*.

### 2.2.1. Comunicación alámbrica

El registrador de datos usa la comunicación serial para la conexión entre el módulo LoPy con el GPRS SIM 900. La transmisión en serie de la información consiste en enviar los bits de un mensaje en forma sucesiva a través de un mismo terminal o pin. Los equipos que se

comunican deben conocer el inicio y el final de la cadena de datos y existen dos formas de hacerlo: transmisión síncrona y asíncrona [4]. La transmisión que se usa es la *Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)* que usa dos hilos y puede ser configurada de forma asíncrona bidireccional no simultánea [4].

### 2.2.2. Comunicación inalámbrica

De todas las opciones de redes inalámbricas disponibles en la actualidad el presente trabajo se centra en las redes de largo alcance y bajo consumo de energía **LPWAN**. Una tecnología importante dentro de las **LPWAN** es **LoRa**.

La tecnología **LoRa** ofrece una comunicación a nivel físico de largo alcance, bajo consumo de energía y transmisión segura de datos. Esto es ideal para conexiones a grandes distancias y para redes de **IoT** que se pueden utilizar en lugares con poca cobertura móvil o redes privadas de sensores o actuadores.

Por su parte, **LoRaWAN** es un protocolo de red de capa de enlace de gran capacidad y de largo alcance que **LoRa Alliance**<sup>1</sup> ha estandarizado para las redes **LPWAN**. **LoRaWAN** define la arquitectura del sistema de la red que ofrece una capa **MAC** basada en la modulación **LoRa**.

Las redes **LoRaWAN** son redes centralizadas que utilizan una topología en estrella. En la topología los *gateways* reenvían los paquetes entre los dispositivos finales o nodos<sup>2</sup> y un servidor de red central. Los *gateways* se conectan al servidor de red a través del protocolo **Internet Protocol (IP)**. En tanto que los dispositivos finales utilizan transmisiones de un solo salto utilizando la capa física **LoRa**. En la Figura 2.1 se observa la arquitectura **LoRaWAN**.

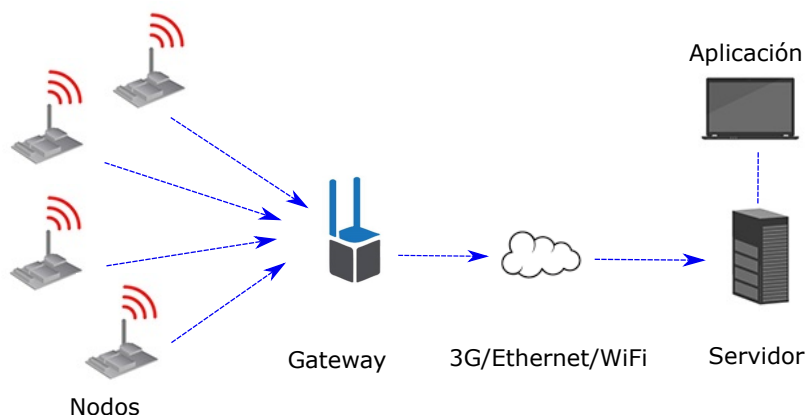


Figura 2.1: Arquitectura general de **LoRaWAN**.

**LoRaWAN** define tres formas diferentes de diferenciar los dispositivos finales en cuanto a consumo energético y latencia que son: clase A, clase B y clase C. Todos los dispositivos

<sup>1</sup><https://www.lora-alliance.org/>

<sup>2</sup>Un nodo es un dispositivo con la capacidad de procesar, reunir información gracias a un sensor y comunicarse con otros nodos o *gateways* de la red.

**LoRaWAN** deben implementar al menos la clase A y deben ser compatibles con dicha clase.

En el presente trabajo se utiliza la clase A. Esta clase ofrece el menor consumo de energía debido a que se pone en modo escucha después de enviar un dato hacia el *gateway*. Es decir, estos sólo pueden recibir un enlace descendente después de enviar un mensaje de enlace ascendente. Es ideal para dispositivos que usan baterías [16].

Por otra parte, **LoRaWAN** implementa soluciones de seguridad en la capa de red. La seguridad es indispensable y necesaria cuando se trabajan con datos meteorológicos, los cuales pueden contener información que requiere ser protegida. Para proteger sus comunicaciones **LoRaWAN** incorpora varias capas de cifrado con claves, que hacen uso del algoritmo de cifrado **Advanced Encryption Standard (AES)**-128:

- **Clave de sección de red:** clave de 128 bits que garantiza la seguridad a nivel de red.
- **Clave de sección de aplicación:** clave de 128 bits que garantiza la seguridad extremo a extremo a nivel de aplicación.

Al tratarse de un protocolo estandarizado, **LoRaWAN** dispone de características establecidas en su especificación. Lo que permite la interoperabilidad entre los dispositivos que implementen dicha tecnología.

## 2.3. Activación de dispositivos finales

En una red **LoRaWAN** existen dos maneras de autenticarse: activación sobre el aire (**Over The Air Activation(OTAA)**) o activación por personalización (**ABP**) [16]. Para lograr estas activaciones los dispositivos finales requieren estos parámetros: una dirección de dispositivo (**Device Address(DevAddr)**), un identificador de Aplicación (**Application Identifier(AppEUI)**), una clave de sesión de red (**Network Session Key(NwkSKey)**) y una clave de sesión de aplicación (**Application Session Key(AppSKey)**). La descripción de cada uno de estos parámetros se resume en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Parámetros almacenadas en el dispositivo final

| Clave   | Descripción  |
|---------|--|
| DevAddr | Consta de 32 bits que identifican al dispositivo en la red.  |
| AppEUI  | Es un identificador global que identifica a una entidad capaz de procesar una trama de solicitud de agregación.                |
| NwkSKey | Se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes <b>MAC</b> .                            |
| AppSKey | Se usa para encriptar y desencriptar la carga útil del campo de carga útil en mensajes de datos específicos de una aplicación. |

Para la activación **OTAA**, los dispositivos finales deben seguir un procedimiento de agregación antes del envío de información con el servidor de red. **OTAA** requiere que el dispositivo





final tenga la siguiente información antes del procedimiento de agregación: un identificador único global ([Device Identifier\(DevEUI\)](#)), el identificador de aplicación ([AppEUI](#)) y la clave AES-128 ([Application Key\(AppKey\)](#)).

En este trabajo se implementa la activación por personalización ([ABP](#)), debido a que el nodo no necesita la capacidad o los recursos para realizar un procedimiento de unión. Este procedimiento agrega al dispositivo directamente a la red sin la necesidad de los mensajes de solicitud y aceptación de la red utilizados en la activación [OTAA](#).

Esta activación requiere que las claves: [DevAddr](#), [NwkSKey](#) y [AppSKey](#) estén almacenadas en el dispositivo final. Cada dispositivo debe tener [NwkSKey](#) y [AppSKey](#) únicas, para no comprometer la seguridad de la comunicación de otros dispositivos. Estas claves deben ser creadas de tal manera que no puedan ser calculadas a partir de información pública.

## 2.4. Conclusiones

Los dispositivos [LoRa](#), forman parte de la red [LoRaWAN](#). La cual es una red de área extensa [LPWAN](#) que proporciona bajo consumo energetico, bajo costo y largo alcance de cobertura.

Por otro lado, el estándar actual [LoRaWAN](#) es un protocolo de red que hace uso de [LoRa](#) con un enfoque [IoT](#). A pesar de que muchas de las características variables de [LoRa](#) son suprimidas en [LoRaWAN](#), se intenta dar opciones al usuario a través de clases y se provee seguridad usando diferentes claves que permiten la encriptación de la información.

[LoRaWAN](#) contiene un nivel relativamente alto de seguridad. Para cumplir con los mayores requisitos de seguridad en redes [IoT](#). Una de las principales razones por las cuales se usa [LoRaWAN](#) es que corresponde a un estándar abierto e ideal para el uso con sensores, lo que implica que es adecuado para aplicaciones del ámbito de desarrollo.





## Capítulo 3

# Estado del Arte LoRa y Trabajos Relacionados

En términos de conectividad inalámbrica y en concreto en adquisición de datos meteorológicos entre dos dispositivos, una de las principales soluciones que se implantó fue la de utilización de un modo de comunicación inalámbrica de sensores, conocido con el nombre de ZigBee, es decir una tecnología [Wireless Personal Area Network \(WPAN\)](#) en configuración en malla. Este tipo de tecnología se caracterizaba por su bajo consumo, ideal para enviar un volumen pequeño de datos a una baja velocidad pero a un alcance muy corto, aproximadamente de unos 30 metros. Esta tecnología tiene como desventaja que para su implantación requiere formar una red de sensores con nodos lo suficientemente próximos entre ellos para que se produzca la comunicación.

Con el paso del tiempo, el interés general por el desarrollo de redes de sensores inalámbricos fue tan grande que surgieron tecnologías tan destacadas como las [LPWAN](#) que superan las ventajas ofreciendo un rango de transmisión de información de largo alcance, de hasta 10 Km en un lugar urbano y hasta 15 Km en un lugar rural.

En la actualidad se pueden encontrar dos tipos de tecnologías [LPWAN](#), por un lado tenemos la tecnología Sigfox y por otro la tecnología [LoRa](#). [LoRa](#) satisface las necesidades de aplicaciones de largo alcance, baja potencia y baja tasa de datos. Por lo que esta tecnología destaca por el hecho de transmitir poca información a baja velocidad maximizando la batería que alimenta estos dispositivos.

En este capítulo, se presenta el estado del arte de la tecnología [LoRa](#) usando el protocolo [LoRaWAN](#), además se analiza los trabajos relacionados aplicando diferentes tipos de tecnología para el sistema de comunicación y transmisión de datos de las estaciones meteorológicas que se está proponiendo.

### 3.1. Tecnología LoRa

Se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva y se ha seleccionado la tecnología de tendencia que detectan mejor las necesidades de la infraestructura de [IoT](#) y la satisface al máximo. A continuación se muestra el estado del arte de la tecnología de tendencia [LoRa](#). Estos artículos nos permitirán analizar las principales características de la tecnología [LoRa](#) en temas respecto al consumo de potencia, rango, eficiencia y costo.

En [\[17\]](#), se evalúa el rendimiento de [LoRa](#) usando distintas configuraciones de transmisión. Los resultados muestran que al utilizar la potencia de transmisión de 14 dBm y el factor de propagación más alto de 12, más del 60 % de los paquetes se reciben desde la distancia de 20 km en una zona rural y hasta 4 km en una zona urbana.

En [\[12\]](#), se evalúa el rango y la cobertura de la tecnología [LoRa](#) en Finlandia, Oulu. Se transmite a una frecuencia de 868 MHz de la banda de [Industrial, Scientific and Medical \(ISM\)](#). Para un nodo que opera en los 868 MHz que utiliza una potencia de transmisión de 14 dBm y el factor de propagación máximo de 12, se observó un rango de comunicación máximo de 15 km en tierra y cerca de 30 km en el agua.

Finalmente en [\[18\]](#), se centra en la evaluación del rendimiento de seguridad del chip moderno LoRa SX1272/73. El contenido de los resultados de este proyecto puede ayudar a elevar el nivel de confianza en la tecnología inalámbrica [LoRa](#).

### 3.2. Trabajos relacionados en el monitoreo y transmisión de datos meteorológicos

Los siguientes proyectos se centran en el sistema de comunicación, monitoreo y transmisión de los parámetros meteorológicos. Estas aplicaciones se han realizado mediante módulos de comunicación ZigBee.

En [\[19\]](#), se implementa una [WSN](#) con una topología jerárquica de 4 áreas, cada área se encarga del monitoreo, detección, recolección y procesamiento de datos. Para la transmisión de los datos en tiempo real se usa la comunicación ZigBee, el rango de transmisión ZigBee de los nodos llega hasta 70 metros. La estructura de la trama se empaqueta de tal forma que la cabecera del clúster realiza la agregación de datos y luego se envía a través de Internet a la base de datos en el servidor. El procesamiento de los datos meteorológicos se realiza mediante el microcontrolador PIC16F877<sup>1</sup>, para la comunicación de los nodos se usa el módulo mote MicaZ<sup>2</sup>.

En [\[20\]](#), se implementa diferentes sensores para un sistema de monitoreo de calidad del agua. El sistema se basa en una [WSN](#). Está compuesto por una red inalámbrica de monitoreo de la

---

<sup>1</sup>El PIC16F877 es un microcontrolador de Microchip Technology fabricado en tecnología CMOS, su consumo de potencia es muy bajo. Tiene un reloj que puede detenerse y los datos de la memoria no se pierden.

<sup>2</sup>El MicaZ es un módulo Mote de 2,4 GHz que se utiliza para habilitar redes de sensores inalámbricos de baja potencia.

calidad del agua y un centro de datos remoto. La plataforma de hardware utiliza el microprocesador inalámbrico CC2430<sup>3</sup> como el núcleo del nodo. La red de sensores está construida con la tecnología inalámbrica Zigbee. El sistema analiza la calidad del agua y envía los datos a Internet con la ayuda de la tecnología móvil GSM/GPRS que tiene un protocolo TCP/IP incorporado. La transmisión de los datos está diseñada para obtener la menor cantidad de consumo energético de los nodos sensores, el software del nodo sensor está diseñado para funcionar en modo de espera y modo activo. El modo de espera, tiene un consumo de energía inferior a 100 uA. En el modo activo, se habilita el módulo RF, por lo que éste tiene un consumo de corriente máxima de hasta 30 mA. Éste proceso dura menos de 1 segundo.

Al ser LoRa una tecnología relativamente nueva, pocas aplicaciones se han desarrollado en el mundo y en Latinoamérica, por lo que se va a analizar algunas aplicaciones usando dicha tecnología, además se va a mostrar aplicaciones que usan el protocolo de comunicación LoRaWAN.

En [21], se implementa una WSN para monitorear el agua. Se usan módulos LoRa con el fin de construir una red con elementos de bajo costo. En dicho proyecto se construyen 2 nodos sensores los cuales monitorean los siguientes parámetros: conductividad eléctrica, pH y temperatura. La implementación de los sensores se realiza mediante un Microcontrolador MSP430F5529 que tiene la tarea de recolectar, procesar y almacenar los datos provenientes de los sensores para posteriormente transmitir la información al nodo transmisor. Para la comunicación entre los dispositivos se usan módulos LoRa RN2903<sup>4</sup> tienen un consumo energético en modo reposo de 1.3 uA y en modo activo de 2.8 mA. Se realizaron pruebas del nodo transmisor al nodo receptor a una distancia de 360 metros durante 5 horas de transmisión y se tomaron 300 datos de temperatura en el río de prueba.

El proyecto [22], tiene como objetivo desplegar una WSN y analizar la comunicación entre nodos y el *gateway* para la prevención de desastres naturales dentro del parque de la Sierra de Castril en Granada. La tecnología que se usa es la comunicación LoRaWAN, la cual dará servicio de comunicación entre nodo y *gateway*, retransmitiendo información por la tecnología móvil de tercera generación a Internet para poder visualizar la información desde cualquier lugar. El diseño de la red se rige por una topología en estrella en la que un *gateway* como elemento central actúa como puente transparente entre los dispositivos recibiendo y retransmitiendo mensajes entre los dispositivos finales y un servidor de red central. Cada *gateway* se conecta al servidor de red utilizando una conexión Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) estándar, mientras que los dispositivos finales utilizan una comunicación inalámbrica de salto único, es decir que la información pasa del dispositivo al *gateway* sin utilizar elementos de comunicación intermediarios.

En [23], se propone el diseño de un sistema de comunicación que permita la transmisión de datos en tiempo real de las estaciones meteorológicas ubicadas en el volcán Antisana en la

---

<sup>3</sup>El CC2430 es una solución de sistema en chip (SoC) específicamente diseñada para las aplicaciones IEEE 802.15.4 y ZigBee.

<sup>4</sup>El RN2903 es un módulo totalmente certificado de 915 MHz basado en la tecnología inalámbrica LoRa de Microchip.

ciudad de Quito. Para su implementación se usó diferentes tecnologías de transmisión como: convertidores RS232 a [TCP/IP](#) (tiene la función de convertir el puerto RS232 del registrador de datos a la tecnología [TCP/IP](#), *Spread Spectrum* (sirve para la transmisión desde las estaciones meteorológicas a la montaña Guamaní-INAMHI) y un módulo [GSM/GPRS](#) (transmite los datos desde Guamaní-INAMHI a Quito). Los equipos están configurados de tal forma que alcanzan una distancia de 5 km con una tasa de transferencia efectiva de datos de 384 a 512 Kbps en una frecuencia de 2.4 GHz.

En [24], se realiza una aplicación de red de área amplia basada en la tecnología [LoRa](#) para el monitoreo del clima en campos agrícolas. El sistema que se propone cuenta con varios sensores que se ubican en áreas agrícolas de gran escala. Cada sensor recopila los datos de los sensores conectados y los envía al *gateway* a una distancia de hasta 2 km. El *gateway* luego transmite los datos recopilados al servidor de red. La estación meteorológica está equipada con sensores ambientales BME280 de Bosh<sup>5</sup>. El procesamiento de datos se realiza mediante una placa Arduino Nano que incluye el chip ATmega328<sup>6</sup>. Se usa el módulo transceptor de RF basado en LoRa de Dorji DRF1278DM<sup>7</sup> para habilitar una solución de bajo consumo para la transmisión de datos inalámbrica de largo alcance. Finalmente, los datos recopilados se reenvían desde el *gateway* al servidor de red mediante el uso del módulo [Wireless Fidelity\(WiFi\)](#).

En [25], se propone una red de monitoreo ambiental usando tecnología [LoRa](#). La arquitectura del modelo propuesto esta formado por: sensores meteorológicos, *gateway* y servidor. Para la comunicación inalámbrica de largo alcance se usa un transceptor de RF basado en [LoRa](#). La unidad de proceso embebida se implementa mediante un microcontrolador. Por último, la visualización de los datos meteorológicos se realiza mediante una pantalla LCD.

Finalmente en [7], se propone el desarrollo de un registrador de datos para estaciones que monitorean los niveles de agua, usando el microcontrolador LoPy, que combina una fácil configuración del sensor por medio de [WiFi](#) y transmisiones de largo alcance con tecnología [LoRa](#). El registrador de datos propuesto posee un suministro de energía solar y permite la transmisión de datos en tiempo real utilizando los transceptores SX1272, mientras que en el *gateway* se integra un módulo [GSM/GPRS](#) para la transmisión hacia el servidor de la estación de monitoreo.

Al realizar una comparación de los proyectos planteados con ZigBee y [LoRa](#) en el sector agrícola, para el control de diversos puntos de una zona; la tecnología ZigBee tiene varias limitaciones, dado que los dispositivos deben estar próximos entre sí y por ende, poseen un limitado rango de cobertura. La tecnología [LoRa](#) plantea una solución para cubrir zonas con superficies mucho más amplias, proporciona seguridad de extremo a extremo, tasas de velocidades más altas y costos bajos de implementación.

<sup>5</sup>El BME280 es un sensor ambiental integrado desarrollado específicamente para aplicaciones móviles donde el tamaño y el bajo consumo de energía son limitaciones de diseño clave.

<sup>6</sup>El Atmega328 es un circuito integrado de alto rendimiento que está basado un microcontrolador RISC de 8 bits.

<sup>7</sup>Dorji aprovecha la técnica LoRa y lanzó el módem de radio de datos de largo alcance DRF1278DM. Proporciona una interfaz UART estándar y admite dos tipos de modos de trabajo: modo estándar y modo de red en estrella.



Los proyectos mencionados anteriormente consideran protocolos genéricos en la capa de enlace de datos y no tienen un manejo adecuado de las variables meteorológicas en la capa aplicativa. El protocolo diseñado e implementado en el presente trabajo permite tener un control adecuado de los datos, y es capaz de ajustar dinámicamente su carga útil en función de la información meteorológica que transporta. Esto con el fin de comprimir al máximo la trama enviada y por consiguiente, reducir el consumo energético global del sistema.

### 3.3. Conclusiones

LPWAN es una nueva tecnología, que tiene el potencial de convertirse en el habilitador de comunicación inalámbrica para una variedad de aplicaciones de IoT. En este capítulo, nos enfocamos en una de las tecnologías LPWAN de perspectiva que actualmente está en crecimiento, llamada LoRa. Por otro lado, el estándar actual LoRaWAN es un protocolo de red que hace uso de LoRa.

En la Sección 3.2 se analizaron los trabajos con la tecnología ZigBee [19] [20], luego se realizó una comparación con los trabajos desarrollados con la tecnología LoRa. Se ha analizado en gran parte las tecnologías existentes acerca de las comunicaciones inalámbricas, haciendo hincapié en la tecnología LoRa, la cual ha sido utilizada en algunos artículos mencionados [7] [21] [22] [23] [24] [25]. La tecnología LoRa es relativamente nueva por lo que se encuentran pocas aplicaciones hasta el momento, sin embargo las aplicaciones ofrecen grandes ventajas mediante el uso de esta tecnología.





## Capítulo 4

# Diseño e Implementación

La contribución principal del presente trabajo es la definición del protocolo de capa de aplicación **VMTP** está diseñado para trabajar sobre **LoRaWAN**. **VMTP** es un protocolo de extremo a extremo que se ejecuta entre los nodos sensores y el servidor. Su principal objetivo es ajustar dinámicamente su carga útil en función de la información meteorológica que transporta. Esto con el fin de reducir al máximo la carga útil de la trama enviada y por ende reducir el consumo energético global del sistema.

En el presente capítulo se describen la arquitectura de la red, las características de los dispositivos utilizados, la definición del tamaño de las variables, la marca de tiempo y finalmente, la implementación del protocolo propuesto en los dispositivos y en el servidor.

### 4.1. Arquitectura de la red

La Figura 4.1 muestra una visión general de la arquitectura de red. Los nodos sensores adquieren los datos meteorológicos y estructuran la trama del protocolo **VMTP**. Luego mediante el protocolo propuesto se envía la trama al *gateway* que es un intermediario entre los nodos y el servidor de red. El *gateway* a su vez se encarga de reenviar la trama hacia el servidor mediante la tecnología **GSM/GPRS**. Finalmente en el servidor se decodifican y se visualizan los datos. Los componentes que forman parte de la red son:

- **Nodos:** son los encargados de la adquisición de los datos meteorológicos, empaquetamiento y transmisión de las variables meteorológicas. En este punto se realiza la compresión de la información.
- **Gateway:** es el encargado de permitir la interacción de los nodos con el servidor. En este punto se realiza el empaquetamiento con los encabezados **LoRaWAN** y se envía a Internet mediante la tecnología **GSM/GPRS**.
- **Servidor:** es el encargado de administrar la seguridad y las tasas de datos.

- **Aplicación:** es la encargada de la decodificación de los datos y visualización de los mismos.

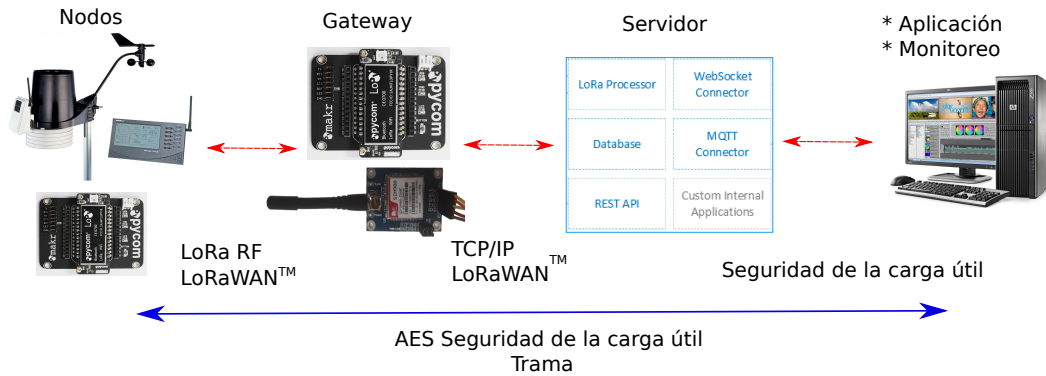


Figura 4.1: Arquitectura de la red con el uso de **LoRaWAN**

#### 4.1.1. Nodo

El método de activación que se usó es el **ABP**. El uso de este método requiere que el usuario defina los siguientes valores:

- Dirección del nodo (**DevAddr**).
- Clave de sección de aplicación (**AppSKey**).
- Clave de sección de red (**NwkSKey**).

Los valores **DevAddr**, **AppSKey** y **NwkSKey** se configuran en el módulo LoPy y en el servidor para realizar el proceso de autenticación. La comunicación entre un nodo y el *gateway* se realiza en base al diagrama de flujo de la Figura 4.2.

Como se observa en la Figura 4.3, el procedimiento de autenticación requiere que las variables de entrada (dirección y claves) están configuradas en el módulo, luego se inicializa la tarjeta **LoRa** en modo **LoRaWAN**, se define el tipo de activación, se coloca la frecuencia según la región y se habilita el *socket* para enviar la trama del protocolo **VMTP**.

La Figura 4.4 muestra el modelo de capas del nodo. Se observa que el nodo posee el protocolo **VMTP** en la capa de aplicación. Adicionalmente el nodo maneja la capa **LoRaWAN** y la modulación **LoRa** en la banda de 915 MHz.

#### 4.1.2. Gateway

La comunicación entre el *gateway* y el servidor de red se realiza en base al diagrama de flujo de la Figura 4.5. Se observa que la comunicación a Internet se realiza mediante la tecnología **GSM/GPRS** usando el protocolo **User Datagram Protocol (UDP)** mediante el puerto 1680,

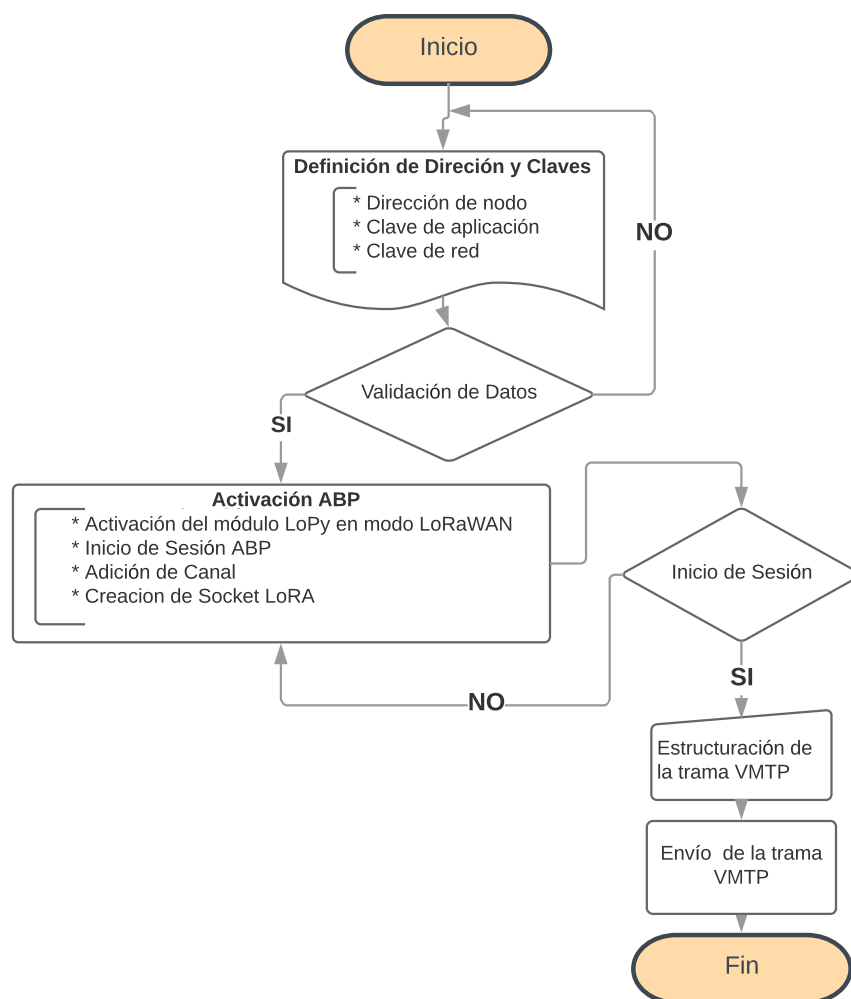


Figura 4.2: Diagrama de flujo del nodo (ABP)

tanto para enlaces ascendentes como para descendentes. En la Sección 4.3 se explica con más detalle el acoplamiento del *gateway* con el módulo GSM/GPRS.

En la primera parte del diagrama de flujo de la Figura 4.5 se describe las variables de entrada que son: nombre y clave de la tarjeta *Subscriber Identity Module* (SIM) usada para el módulo GSM/GPRS, nombre y puerto del servidor, frecuencia de operación LoRa y finalmente, el nombre del servidor *Network Time Protocol* (NTP)<sup>1</sup>. Si los datos están correctos se inicia la sesión del *gateway* en el servidor.

El nombre de la tarjeta SIM que se usa es internet.claro.com.ec. El nombre y puerto del servidor hace referencia a la dirección pública del servidor en este caso es el 190.15.132.17

<sup>1</sup>Es un protocolo de Internet para sincronizar los tiempos de los equipos a través del enrutamiento de paquetes.

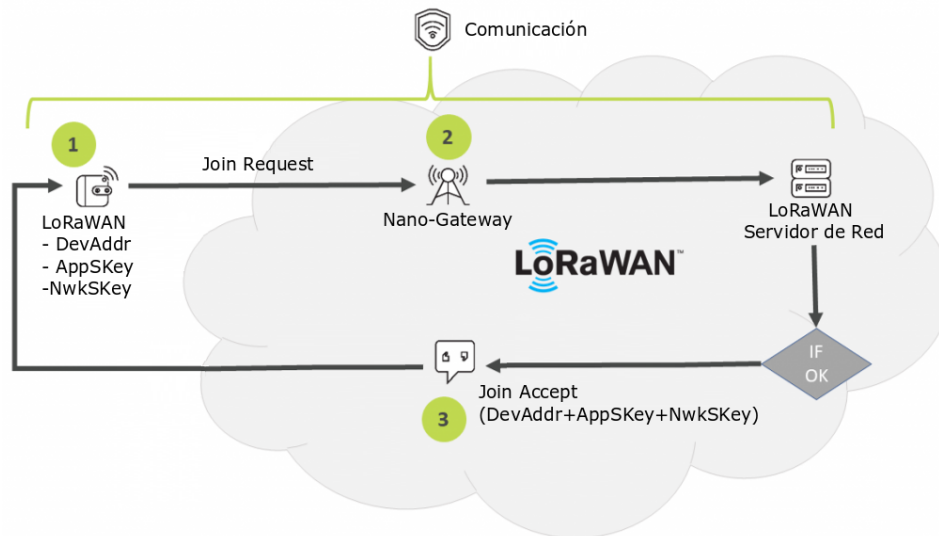


Figura 4.3: Proceso de agregación de nodos.

y el puerto que se usa es el 1680. El nombre del servidor [NTP](http://pool.ntp.org) es [pool.ntp.org](http://pool.ntp.org). Finalmente, la frecuencia que se usa es 903.9 MHz con un tasa de codificación de 4/5 y un factor de ensanchamiento de 7.

En la Figura 4.4 se muestra el modelo de capas del *gateway*. Dos tipos de tecnologías de transmisión inalámbricas son usadas en el *gateway* para el reenvío de paquetes. La tecnología [LoRa](#) que sirve para la comunicación con los nodos sensores, y la red de retorno IP (*Backhaul IP stack*) que sirve para la conexión a la red móvil de segunda generación.

### 4.1.3. Servidor

El punto de partida para montar el servidor es “*Compact server for private LoRaWAN networks*” que se encuentra disponible en [1]. A este servidor se le realizan modificaciones en función de los requerimientos de nuestro trabajo propuesto. La configuración e instalación del servidor, la configuración del *gateway*, la configuración de la red [LoRaWAN](#) y la configuración de la aplicación usando [ABP](#) se detallan en el Apéndice A.

El servidor [LoRaWAN](#) es de código abierto, éste integra tanto el servidor de red como el servidor de aplicaciones. Esto es útil para proveedores de aplicaciones que operan su propia red [LoRaWAN](#). El servidor [LoRaWAN](#) presenta las siguientes características:

- Implementa la especificación [LoRaWAN](#) v1.0.3
- Se comunica con varios *gateways* de enlace [LoRaWAN](#). Actualmente es compatible con todos los *gateway* basados en el reenvío de paquetes en el enlace descendente.
- Realiza todas las comprobaciones requeridas de encriptación e integridad. Además admite

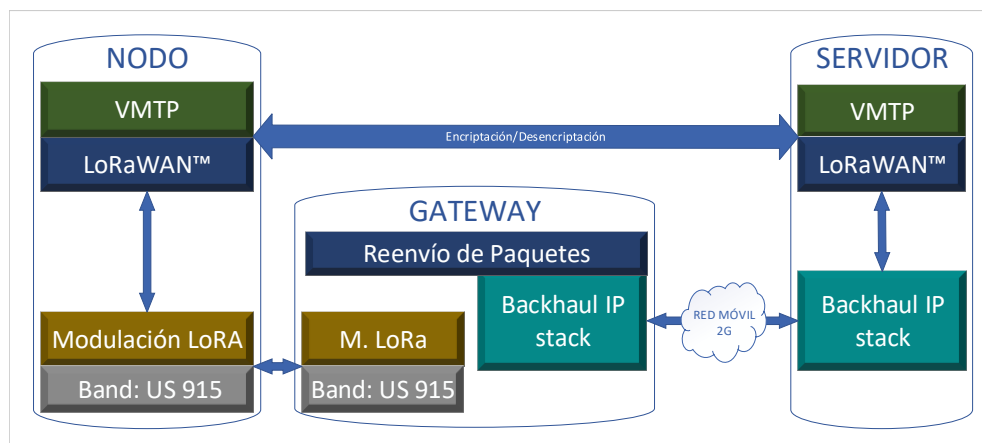


Figura 4.4: Capas del protocolo VMTP: capas del nodo, capas del gateway y capas del servidor.

una verificación de autenticación de dispositivos con activación por personalización ABP.

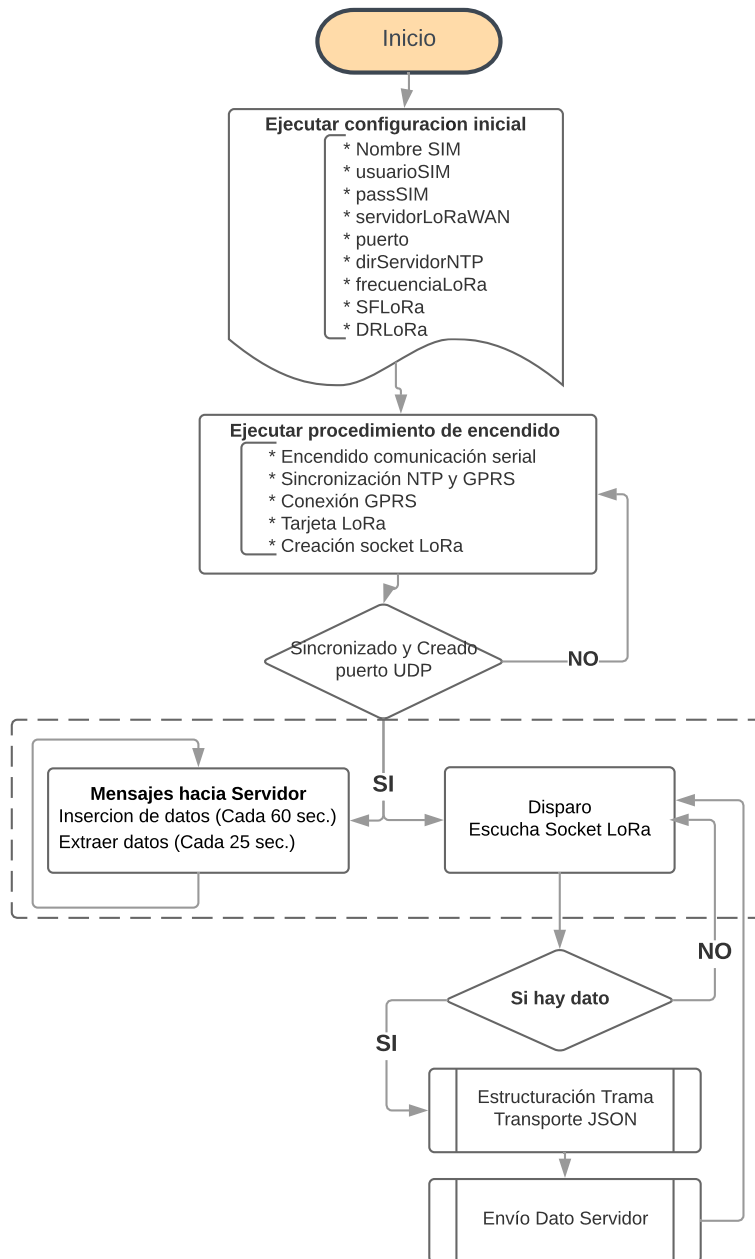
- Analiza automáticamente los formatos de carga útil conocidos. Actualmente es compatible con el protocolo *Cayenne Low Power Payload* [26].
- Almacena datos de enlace ascendente directamente en una colección MongoDB<sup>2</sup>
- Maneja dispositivos clase A o clase C. Admite tanto la activación del nodo por personalización (ABP) como la activación por aire (OTAA).
- Por su implementación en Erlang<sup>3</sup> tiene un diseño de sistema tolerantes a fallas.

La aplicación desarrollada se ejecuta en el servidor. El objetivo de la aplicación es decodificar la trama del protocolo LoRaWAN que se envía del gateway mediante Internet al servidor de red. Una vez decodificada dicha trama, se procede a decodificar la trama del protocolo VMTP que se estructuró en el nodo y que contiene los datos meteorológicos. Finalmente, decodificada la trama del protocolo VMTP se visualiza los datos de las variables meteorológicas para que sea visible a cualquier usuario.

La Figura 4.4 muestra el modelo de capas del servidor que está conformado por: la capa de red, la capa de Internet y la capa de transporte (UDP) que corresponden a la red de retorno IP. Como la comunicación nodo-servidor es extremo a extremo, el servidor central trabaja con la capa LoRaWAN y la capa de aplicación donde se ejecuta el protocolo VMTP.

<sup>2</sup>MongoDB es una base de datos orientada a documentos. Los documentos los guarda en BSON, que es una forma de representar de forma binaria objetos JavaScript Object Notation (JSON).

<sup>3</sup>Erlang es un lenguaje de programación utilizado para construir sistemas de tiempo real de gran escala con requisitos de alta disponibilidad.

Figura 4.5: Diagrama de flujo del *gateway*

## 4.2. Descripción de equipos

En este proyecto se usaron los siguientes dispositivos:

**Módulo LoPy:** es una tarjeta de desarrollo con un microcontrolador compatible con MicroPython (Figura 4.6). Esta tarjeta tiene tres tecnologías de comunicación inalámbrica independientes (*Bluetooth*, *LoRa* y *WiFi*) y permite el acceso a nuevas redes *LPWAN* [8]. En el Apéndice D se detallan las características técnicas del dispositivo.

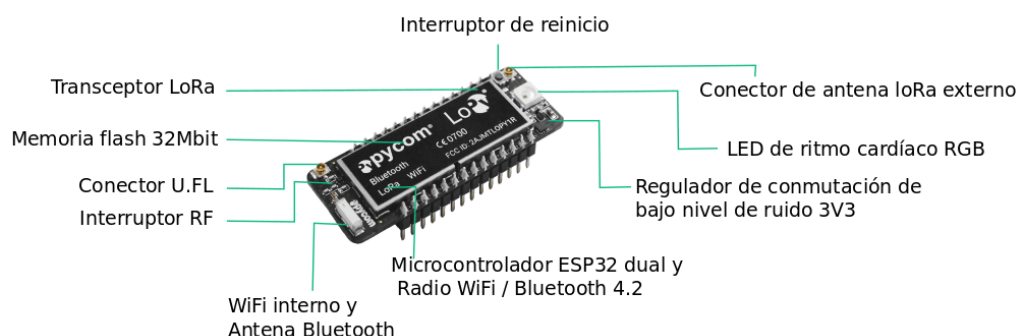


Figura 4.6: Módulo LoPy

**Placa de expansión** es una placa que provee alimentación y salida a los pines del LoPy, se puede observar en la Figura 4.7 dicha placa. En el Apéndice D se detallan las características técnicas del dispositivo.

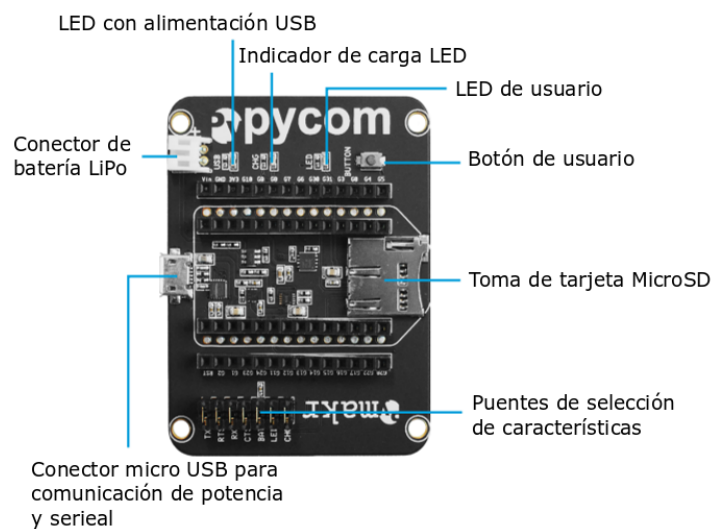


Figura 4.7: *Expansion Board 2.0*

**Módulo GSM/GPRS SIM900:** es una solución *GSM/GPRS* de banda cuádruple (Figura 4.8). Maneja las bandas *GSM/GPRS* 850/900/ 1800/1900MHz para voz, *Short Message*

Service (SMS) y datos con un bajo consumo de energía. Debido a su configuración de 24mm x 24mm x 3mm, se adapta a los requisitos de espacio de nuestro proyecto. En el Apéndice D se detallan las características técnicas del dispositivo.

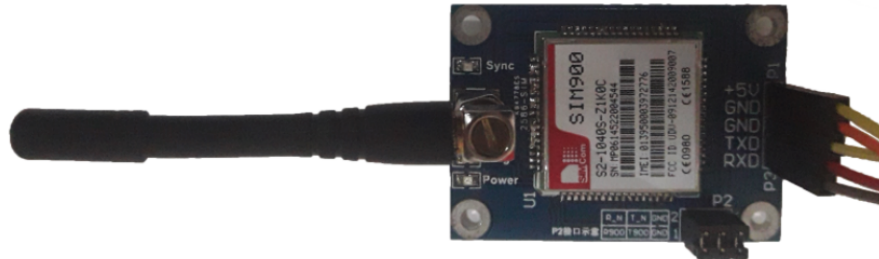


Figura 4.8: Módulo GSM/GPRS SIM900

### 4.3. Implementación de GSM/GPRS en el *gateway*

En principio, el *gateway* se comunica con el servidor mediante WiFi, en vista de que el protocolo LoRaWAN tiene librerías para esta tecnología. Sin embargo para este trabajo se optó por implementar la tecnología móvil GSM/GPRS para la conexión a Internet, debido a que los sensores se encuentran ubicados en zonas rurales donde solo existe cobertura GSM/GPRS (en ciertos puntos); además, esta tecnología se adapta al ancho de banda requerido para los sensores [27].

La comunicación entre los módulos LoPy y GPRS SIM 900 es por medio de una transmisión asíncrona UART. La sincronización de los módulos se realiza mediante el servidor NTP. La función de sincronización se encarga de la conexión y obtención del tiempo de red del servidor NTP. Para esto se debe ingresar: el usuario, contraseña y región del servidor NTP. Luego, se debe configurar el módulo GPRS SIM 900. En esta parte se realiza la conectividad móvil, permitiendo engancharse a Internet mediante una conexión de datos.

La funciones de envío y recepción de datos mediante el módulo GPRS SIM 900, fueron diseñadas de tal forma que el resto de funciones del *gateway* no se vean afectadas. El código fuente de implementación desarrollado se encuentra disponible en [28].

### 4.4. Definición del tamaño de las variables

En esta sección se analizan las variables meteorológicas con las que se van a trabajar para comprimir los datos y determinar la cantidad de bits necesarios en cada variable para la transmisión. Para esto fue necesario un análisis de los valores máximos y mínimos de las variables en el Ecuador como a nivel mundial.



#### 4.4.1. Temperatura

En Ecuador el valor máximo registrado por el [Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología \(INAMHI\)](#) es de  $35.7^{\circ}\text{C}$ , en la región Litoral [29]. El valor mínimo registrado es de  $-5^{\circ}\text{C}$  en el parque nacional El Cajas, a 4.000 metros sobre el nivel del mar [30]. A nivel mundial, la temperatura máxima registrada alcanzó los  $56.7^{\circ}\text{C}$  en la estación de Furnace Creek, situada en el conocido Death Valley en EE.UU. [31]. Finalmente el valor mínimo registrado es de  $-58.1^{\circ}\text{C}$  en el pueblo de Ust'Shchugor, Rusia [32].

#### 4.4.2. Humedad

Respecto a la humedad el valor mínimo registrado a nivel mundial es de 0.3 % en Safi-Abad Dezful, Irán [33]. La elevada nubosidad y gran cantidad de días lluviosos hace que los climas oceánicos tengan humedades relativas superiores al 75 % [34]. En el caso de Ecuador no se tienen mediciones concretas debido a que el clima es muy variable pero en [35], se tiene una lista de valores que son útiles para obtener un rango de tolerancia que va de 70 % a 90 %.

#### 4.4.3. Velocidad del viento

La máxima velocidad del viento registrada en Ecuador es de 50 km/h en Tababela [36]. La máxima velocidad registrada a nivel mundial es en el Monte Washington, Estados Unidos alcanzó 371 km/h [37]. La mínima velocidad de viento es de 0 km/h.

#### 4.4.4. Dirección del viento

Para la dirección del viento se usa el principio de la rosa de los vientos. Esta consiste en un símbolo circular que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte, es decir, norte, sur, este y oeste. Además, usa los ocho rumbos colaterales [38].

#### 4.4.5. Precipitación

La menor precipitación registrada es de 0,2 mm por año en Quillagua, Chile. En tanto que la mayor precipitación registrada es de 26,47 mm por año en Cherrapunji, India [39]. El clima en Ecuador es tropical húmedo, con lluvias durante todo el año y la precipitación mayor es de 2500 mm al año, de acuerdo con Koppen y Geiger [40]. El mes más seco es julio con 20 mm de precipitación y el con mayor precipitación es marzo con 95 mm [41].

#### 4.4.6. Radiación ultravioleta

El índice UV es un indicador de la intensidad de radiación ultravioleta proveniente del Sol en la superficie terrestre. Este viene en una escala que comienza en 0 y no está acotado superiormente. El índice UV mayor registrado fue en Perú donde se alcanzó hasta 20 puntos, un



nivel considerado “extremo” [42]. En Ecuador el índice UV más alto registrado es de 16 puntos [43].

#### 4.4.7. Presión atmosférica

El mayor dato registrado de la presión atmosférica por encima de los 750 metros es de 1084,4 hPa el 19 de diciembre de 2001 en Mongolia Tosontsengel. En tanto que la menor presión atmosférica (con exclusión de los tornados) es de 870 hPa, registrada el 12 de octubre de 1979 en la cola del tifón TIP, al oeste de Guam, océano Pacífico [44].

#### 4.4.8. Radiación solar

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia. Ésta mide la potencia que por unidad de superficie alcanza a la Tierra. Su unidad es el  $W/m^2$ . El Ecuador tiene altos niveles de radiación solar, según el INAMHI. El índice de radiación ultravioleta tiene niveles altos para la región Litoral y Amazónica, mientras que en la región Interandina se presentan índices extremadamente altos [45].

Una vez determinado cuales son los datos máximos y mínimos registrados en Ecuador como en el mundo. Se procede a obtener los datos máximos y mínimos registrados de los equipos Davis que se encuentra en las estaciones meteorológicas de la Universidad de Cuenca. Esto se realiza para definir los tamaños de cada variable meteorológica en bits.

En la Tabla 4.1 se observa la columna Difer. que representa la diferencia máxima con respecto a la mínima de cada variable, esto se realiza para determinar la resolución. La resolución se encuentra en la columna Resol. Finalmente, se determina la cantidad de bits de cada variable y en las columnas Nuevo Max y Min se observa el rango de holgura que dispone cada variable meteorológica según el tamaño de bits que se propuso.

Se define como variación (delta) a la diferencia entre la muestra presente respecto a la muestra pasada registrada de un sensor en un determinado tiempo. Con esta definición, se obtienen las variaciones de los datos registrados de la estación meteorológica Davis. Con las mismas características que se obtuvo la Tabla 4.1 se realiza la Tabla 4.2 donde se define el tamaño de bits para la variación de cada dato.



Tabla 4.1: Análisis a partir de los datos en el Ecuador, el mundo y *Davis Vantage Pro2 Plus*.  
(Datos originales)

| Parám.                               | Davis<br>Max | Davis<br>Min | Ecuador<br>Max | Ecuador<br>Min | Global<br>Max | Global<br>Min | Difer. | Resol. | #<br>Bits | Nuevo<br>Max | Nuevo<br>Min |
|--------------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|--------|--------|-----------|--------------|--------------|
| Temp.<br>(°C)                        | 24.7         | 6.6          | 35.7           | -5             | 56.7          | -58.1         | 18.1   | 181    | 9         | 41.1         | -10          |
| Hum.<br>(%)                          | 92           | 22           | 100            | 10             | 100           | 0.3           | 70     | 70     | 7         | 100          | 0            |
| Vel.<br>Viento<br>(Km/h)             | 4.9          | 0            | 13.8           | 0              | 371           | 0             | 4.9    | 49     | 9         | 51.2         | 0            |
| Dir.<br>Viento                       | 15           | 0            | 15             | 0              | 15            | 0             | 15     | 15     | 4         | 15           | 0            |
| Pres.<br>Atm.<br>(hPa)               | 1008.5       | 993.8        | 1015.3         | 989            | 1084.4        | 870           | 14.7   | 147    | 9         | 1026.1       | 970          |
| Precip.<br>(mm)                      | 8.8          | 0            | 24             | 0              | 38            | 0             | 8.8    | 88     | 9         | 51.2         | 0            |
| Rad.<br>Solar<br>(W/m <sup>2</sup> ) | 1334         | 0            | 1800           | 0              | 1800          | 0             | 1334   | 1334   | 12        | 4096         | 0            |
| Índice<br>UV<br>(Puntos)             | 16           | 0            | 18             | 0              | 20            | 0             | 16     | 160    | 8         | 25.6         | 0            |

Tabla 4.2: Análisis a partir de la variación de los datos en *Davis Vantage Pro2 Plus*

| Parámetros                     | Davis<br>Max | Davis<br>Min | Diferencia | Resolución | #<br>Bits | Nuevo<br>Max | Nuevo<br>Min |
|--------------------------------|--------------|--------------|------------|------------|-----------|--------------|--------------|
| Temperatura (°C)               | 1.1          | -1.2         | 2.3        | 23         | 5         | 1.5          | -1.6         |
| Humedad (%)                    | 6            | -9           | 15         | 15         | 5         | 15           | -16          |
| Vel. Viento (km/h)             | 4.9          | -6.4         | 11.3       | 113        | 8         | 12.7         | -12.8        |
| Dirección Viento               | 15           | 0            | 15         | 15         | 4         | 15           | 0            |
| Presión Atm. (hPa)             | 1            | -0.8         | 1.8        | 18         | 5         | 1.5          | -1.6         |
| Precipitación (mm)             | 0.6          | -0.8         | 1.4        | 14         | 5         | 1.5          | -1.6         |
| Rad. Solar (W/m <sup>2</sup> ) | 689          | -414         | 1103       | 1103       | 11        | 1023         | -1024        |
| Índice UV (Puntos)             | 9.6          | -7.8         | 17.4       | 174        | 8         | 12.7         | -12.8        |

## 4.5. Diseño del protocolo propuesto (VMTP)

El protocolo propuesto **VMTP** tiene como objetivo ajustar dinámicamente su carga útil en función de la información meteorológica que transporta. Esto con el fin de comprimir al máximo la trama enviada y por ende reducir el consumo energético global del sistema. A partir de los resultados presentados en las Tablas 4.1 y 4.2, se define los tamaños de las variables y se estructura la trama **VMTP**.

La trama **VMTP** utiliza: la carga útil normal y la carga útil corta. La carga útil normal representa los valores registrados por los sensores meteorológicos. Mientras que la carga útil corta representa la variación en un determinado tiempo de la carga útil normal.

- **Marca de tiempo:** para enviar la información de la *marca de tiempo*<sup>1</sup> se usa el formato *epoch*<sup>2</sup>. Por otra parte, para la compresión de datos se definieron 24 bits (3 Bytes) que se envían en la carga útil normal. En el caso de la carga útil corta se envían 12 bits (2 Bytes). La decodificación de la marca de tiempo se puede observar en el Apéndice B.
- **Temperatura:** el tamaño para la variable de temperatura es de 9 bits, permitiendo tener una holgura con respecto a la temperatura máxima y mínima registrada en Ecuador de 5 grados, por lo tanto el intervalo de la variable estará entre los -10°C y 41.1°C. Para el caso de la variación se asignan 5 bits a la variable de la temperatura.
- **Humedad:** el tamaño para la variable de humedad es de 7 bits, permitiendo tener un intervalo de 0 a 100 %. Para el caso de la variación se asignan 5 bits a la variable de la humedad.
- **Velocidad del viento:** el tamaño de la variable de la velocidad del viento es de 9 bits, permitiendo tener un intervalo de 0 a 51.2 m/s. Para el caso de la variación se asignan 8 bits a la variable de la velocidad de viento.
- **Dirección del viento:** la estación Davis mide la dirección del viento en puntos cardinales en una rosa de los vientos con ocho rumbos colaterales. Por lo tanto, este da un total de 16 puntos cardinales. Se asignan 4 bits para el tamaño de la variable de la dirección del viento.
- **Precipitación:** el tamaño para la variable de precipitación es de 9 bits lo que permite tener un intervalo de 0 a 25.5 mm, que es suficiente para este trabajo debido a que la transmisión se va a realizar cada 5 minutos y máximo cada hora. Para el caso de la variación se asignan 5 bits a la variable de la precipitación.
- **Radiación ultravioleta:** el tamaño de la variable de la radiación ultravioleta es de 8 bits, permitiendo tener un intervalo de 0 a 25 puntos. Para el caso de la variación se asigna 8 bits a la variable.
- **Presión atmosférica:** el tamaño de la variable de la presión atmosférica es de 9 bits, permitiendo tener un intervalo de 970 a 1026.1 hPa. Para el caso de la variación se asignan

<sup>1</sup>Es una secuencia de caracteres o información codificada que identifica cuándo ocurrió un determinado evento, por lo general dando la fecha y la hora del día.

<sup>2</sup>El formato epoch codifica información de fecha y hora en 4 bytes

5 bits a la variable.

- **Radiación Solar:** el tamaño de la variable de la radiación solar es de 12 bits, permitiendo tener un intervalo de 0 a 4096 W/m<sup>2</sup>. Para el caso de la variación se asignan 11 bits a la variable.

#### 4.5.1. Carga útil normal

Las variables meteorológicas se envían cada 5 minutos. La carga útil, las variables meteorológicas, y el tamaño de la variación de los datos se analizaron en la Sección 4.4. La Figura 4.9 muestra la carga útil normal del protocolo VMTP, el tamaño de la carga útil normal a enviar es de 91 bits (12 Bytes).

| 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7  | 8 |           |
|----|---|---|---|---|---|---|----|---|-----------|
| 24 | 9 | 7 | 9 | 4 | 9 | 9 | 12 | 8 | } N° Bits |

Figura 4.9: Carga útil normal.

#### 4.5.2. Carga útil corta

En la estación meteorológica los sensores toman mediciones cada 5 minutos generando de esta forma una gran cantidad de datos. Con el fin de enviar la menor cantidad de datos posibles, se plantea mandar solo la variación de los datos. Al realizar dicho proceso se obtuvo una carga útil con un menor número de bits (Figura 4.10).

Al enviar la carga útil corta de las variables, se tiene 63 bits (8 Bytes). De esta forma, se logra una reducción del 33.3 % en el envío de los datos en comparación con la carga útil normal.

| 0  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7  | 8 |           |
|----|---|---|---|---|---|---|----|---|-----------|
| 12 | 5 | 5 | 8 | 4 | 5 | 5 | 11 | 8 | } N° Bits |

Figura 4.10: Carga útil corta.

### 4.5.3. Banderas de control

Se definen tres banderas que permiten controlar los datos en la aplicación. Estas banderas son las siguientes:

- **Bandera de variación:** representa si el dato es el original o su variación (1 bit).
- **Bandera de nulos:** representa si los datos son nulos o válidos (8 bits, 1 bit por cada variable).
- **Bandera de ceros:** representa si los datos son cero o no (4 bits para carga útil normal y 8 bits para carga útil corta).

### 4.5.4. Diseño de la trama del protocolo VMTP

En la Figura 4.11, se estructura la trama del protocolo [VMTP](#) incluyendo las banderas y las variables meteorológicas. Este modelo de trama contiene la bandera de nulos que representa si el valor es nulo. Un valor nulo puede representar una falla de comunicación de los sensores con la estación o el mal funcionamiento de los mismos. La bandera de ceros es de 4 bits, debido a que representa solo a las variables que pueden valer cero. Esas variables son: Velocidad de viento, Lluvia, Radiación solar y Índice UV. Toda la trama [VMTP](#) normal representa 104 bits que son 13 bytes.

|                    |                 |                |                |                          |     |
|--------------------|-----------------|----------------|----------------|--------------------------|-----|
| 0                  | 1               | 25             | 33             | 37                       | 104 |
| Band. de variación | Marca de tiempo | Band. de nulos | Band. de ceros | Variables Meteorológicas |     |

Figura 4.11: Modelo de la trama normal del protocolo [VMTP](#)

En la Figura 4.12, se estructura la trama del protocolo [VMTP](#) con la carga útil corta. La bandera de nulos se suprime debido a que ésta puede ser representada por la bandera de ceros. Es decir, si en la trama de carga útil normal se envía un valor nulo, el siguiente volverá a ser nulo, lo que implica que no existe ningún cambio y el valor de paso es cero.

La bandera de ceros en este caso consta de 8 bits, porque todas las variables en algún tiempo podrían llegar a no tener variaciones, lo que se traduce a un valor de cero de variación. La trama [VMTP](#) corta representa 72 bits que son 9 bytes.

|                      |                 |                  |                          |    |
|----------------------|-----------------|------------------|--------------------------|----|
| 0                    | 1               | 13               | 21                       | 72 |
| Bandera de variación | Marca de tiempo | Bandera de ceros | Variables meteorológicas |    |

Figura 4.12: Modelo de la trama corta del protocolo [VMTP](#)

Una vez definidas las estructuras de trama del protocolo [VMTP](#), esta trama es encapsulada con los encabezados que usa [LoRaWAN](#).



## 4.6. Conclusiones

[LoRa Alliance](#) es una asociación sin fines de lucro de organizaciones que trabajan juntas para estandarizar las redes [LPWAN](#). La nueva especificación [LoRaWAN](#) introducirá cambios significativos en los protocolos de red existentes y las comunicaciones [LoRaWAN](#).

La evaluación de las variables meteorológicas se realizó mediante datos obtenidos del equipo *DAVIS Vantage Pro2 Plus*. Para obtener la cantidad necesaria de bits para transmitir al servidor [LoRaWAN](#), se tomó en cuenta los datos medidos a nivel mundial y del país. Con esto se realizó una buena compresión de datos, con el objetivo de reducir el consumo energético de los nodos.

El control de las banderas implementadas en la carga útil de las variables meteorológicas es esencial para que se compriman los datos. Estas banderas tienen el objetivo de analizar cuales son las variables que tienden a cambiar con mayor frecuencia en un determinado tiempo y cuáles son las que tienden a perderse. Las variables con las cuales se obtiene mayor compresión de datos son las que sus valores son iguales a cero.

Por otra parte, se optó por implementar el módulo [GSM/GPRS](#) modelo SIM900, debido a que algunos sensores se encuentran en lugares rurales y no disponen de cobertura a Internet, y por lo tanto, el *gateway* no podría engancharse con el servidor. Para ubicar el *gateway* es necesario realizar un barrido de la zona en busca de cobertura, una vez que se encuentre cobertura.







## Capítulo 5

# Pruebas y Discusión

Habiendo implementado la red mostrada en la Figura 4.1, y una vez montado la aplicación en el servidor de la Universidad de Cuenca. Se procede a evaluar el protocolo y su implementación. Se verificó la comunicación de los nodos con el *gateway* y la sincronización de este último con el servidor. El servidor almacena la información recibida de los nodos según el tiempo de recepción en su base de datos.

En este capítulo se realizan pruebas de transmisión de datos, con el objetivo de verificar la conectividad de los nodos con el *gateway* y este a su vez con el servidor. Luego, se realiza una comparación de la transmisión de datos con y sin el protocolo VMTP. Además, se analiza el consumo de datos del módulo GSM/GPRS modelo SIM900. Finalmente, se comprueba el ahorro de energía que se alcanza al usar el protocolo VMTP propuesto.

### 5.1. Pruebas de conectividad

Se ha podido verificar que el conjunto de programas nodos/*gateway*/servidor desarrollados, presentan un funcionamiento adecuado y permiten efectuar la transmisión segura y confiable de los datos meteorológicos entre un nodo remoto y el servidor. Se contemplan ciertos criterios de protección contra fallos para minimizar la pérdida de datos y de esta manera, aumentar la versatilidad de la comunicación.

El nodo recolecta y transmite al *gateway* los datos de la estación meteorológica. En el Listado 5.1 se observa a manera de ilustración una secuencia del envío de la tramas del protocolo VMTP hacia el *gateway*.

En el Listado 5.2, por su parte se observa una captura de la conexión del *gateway* con el servidor LoRaWAN. El procedimiento inicia con el módulo GSM/GPRS conectándose a Internet. A continuación se establece la conexión con el servidor NTP “*pool.ntp.org*” y se realiza la sincronización. Posteriormente, se crea el *socket* UDP con el servidor y finalmente, el *gateway* está listo para reenviar los datos hacia el servidor.



Listado 5.1: Captura del envío de una secuencia de datos del nodo hacia el *gateway*.

```
Sending: b'\xff\x8c\x8e\x16\x12v\x98' #: 1-1
Sending: b'\xc4\xb0\xb0\x92@' #: 1-2
Sending: b'\xc4\xb0\xb0\x91' #: 1-3
Sending: b'\x1f\xc7(\x15T\x06\x80\x00\x02\xf7S|&L\x00\x80\xa0' #: 1-4
Sending: b'\xc4\xb0\xb0\x920' #: 1-5
```

Listado 5.2: Captura de la conexión del *gateway* con el servidor de red.

```
[1653.230] Starting LoRaWAN nano gateway with id: b'240AC4FFFE0245F0'
[1654.647] Syncing time with pool.ntp.org ...
[1666.261] RTC NTP sync complete at: (2018, 8, 27, 352277, None)
[1669.886] GPRS connected to internet.claro.com.ec
[1678.599] GPRS opening UDP socket to 190.15.132.17 (None) port 1680.
[1678.788] Setting up the LoRa radio at 903.9001 Mhz using SF7BW125
[1678.802] LoRaWAN nano gateway online
[1678.805] You may now press ENTER to enter the REPL
```

Para ingresar a la aplicación desde cualquier lugar, se solicitó al [Departamento de Tecnología Informática y Computación \(DTIC\)](#) de la Universidad de Cuenca que el servidor tenga una dirección pública. La dirección pública es [190.15.132.17](#). Se configura la aplicación para que escuche en el puerto 1680. El envío de datos se realiza mediante un *socket UDP*. La administración del servidor se la realiza desde el puerto 8080. Se requiere un usuario y contraseña válidos para ingresar a la aplicación.

En la Figura 5.1 se verifica la conexión del *gateway* cuya dirección [MAC](#) es: 240AC4FFFE0245F0. Además, se observa en: 1.) la dirección pública de la universidad con el puerto de administración 8080 y; 2.) el estado (*status*) de la sincronización del *gateway* con el servidor.

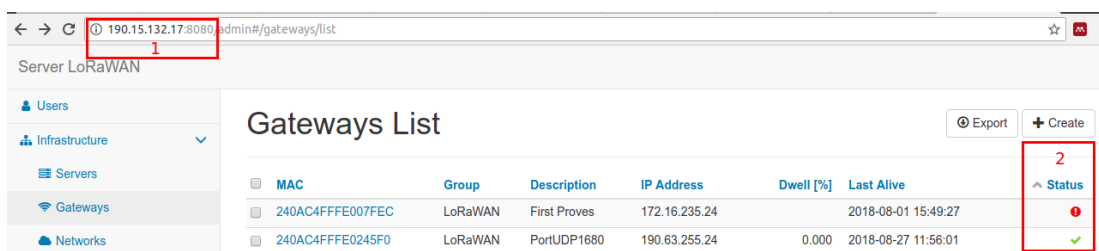


Figura 5.1: Programa del servidor

## 5.2. Pruebas de transmisión

Con el fin de evaluar la contribución del protocolo [VMTP](#), en esta sección se realizan dos tipos de transmisión de datos, la primera usando la carga útil corta, y la segunda usando la carga útil normal. Adicionalmente, cada una de las transmisiones es comparada con una trama sin ningún tipo de datos de control, es decir sin banderas. Finalmente, para la verificación del protocolo se comparan las diferentes configuraciones [VMTP](#) con la carga útil de baja potencia Cayenne [26]. Actualmente Cayenne Low Power Payload se usa de forma general para el envío de datos sobre redes [LPWAN](#) como [LoRaWAN](#).

El [PROMAS](#) recolecta información de las estaciones meteorológicas de la Universidad de Cuenca cada 5 minutos. Para el análisis de los resultados de este trabajo se utilizó un archivo facilitado por el [PROMAS](#) con datos recopilados en 30 horas y 20 minutos, teniendo un total de 364 datos en adelante datos de prueba.

### 5.2.1. Comparación de tramas en la capa de aplicación

En la Figura 5.2, se muestran los promedios y las desviaciones estándar de las longitudes de trama de los datos de prueba, con 4 diferentes configuraciones del protocolo [VMTP](#). Las tramas utilizan la carga útil corta y normal, con el uso de banderas (CB) y sin ellas (SB). Además, se muestra el promedio y la desviación estándar utilizando el protocolo Cayenne. Este análisis se lo realiza en la capa de aplicación. Los promedios de las longitudes de trama usando el protocolo [VMTP](#) con carga útil corta son menores como cuando se usa el protocolo [VMTP](#) de carga útil normal.

Las banderas introducen variabilidad en la longitud de trama; por esto, existe desviación estándar, tanto en [VMTP CB Corta](#) como en [VMTP CB Normal](#). Sin las banderas la longitud de trama es constante.

Cayenne a diferencia del protocolo [VMTP](#) no realiza un estudio específico de las variables meteorológicas, obviando un análisis en el orden de bits, sino en el orden de los bytes para determinar las longitudes de cada variable. Adicionalmente, Cayenne utiliza un byte de identificación que se ubica al principio de cada variable. De esta manera, la longitud de trama de Cayenne es considerablemente mayor, así como su desviación estándar.

Como medida adicional de análisis se muestra el número total de bytes que se generan al enviar los datos de prueba con las diferentes configuraciones del protocolo [VMTP](#) y Cayenne. Los resultados se muestran en la Figura 5.3.

### 5.2.2. Comparación de tramas en la capa LoRaWAN

En las Figuras 5.4 y 5.5, se muestra el mismo análisis de la Subsección 5.2.1, pero a nivel de la capa [LoRaWAN](#). Es necesario mostrar estas gráficas debido a que estas longitudes de trama son las que se envían al módulo [LoRa](#) para posteriormente ser moduladas y propagadas en el medio.

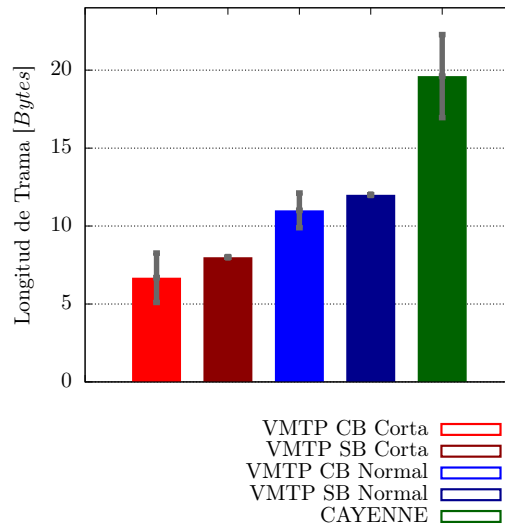


Figura 5.2: Promedio y desviación estándar de las diferentes configuraciones VMTP y Cayenne en la capa de aplicación.

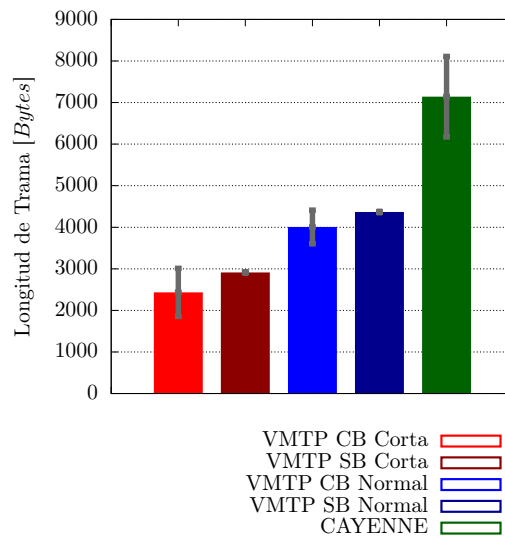


Figura 5.3: Total de bytes enviados usando las diferentes configuraciones VMTP y Cayenne en la capa de aplicación.

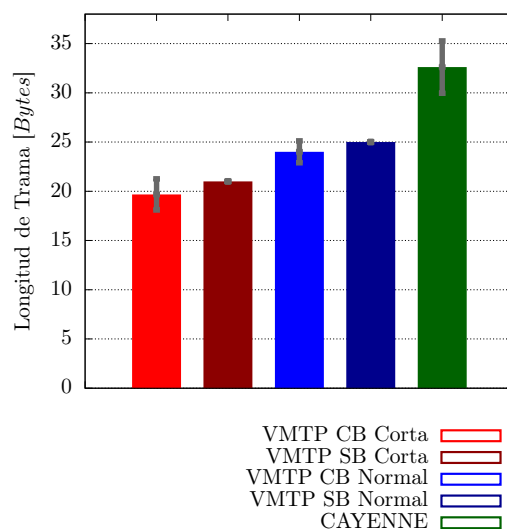


Figura 5.4: Promedio y desviación estándar de las diferentes configuraciones VMTP y Cayenne en la capa LoRaWAN.

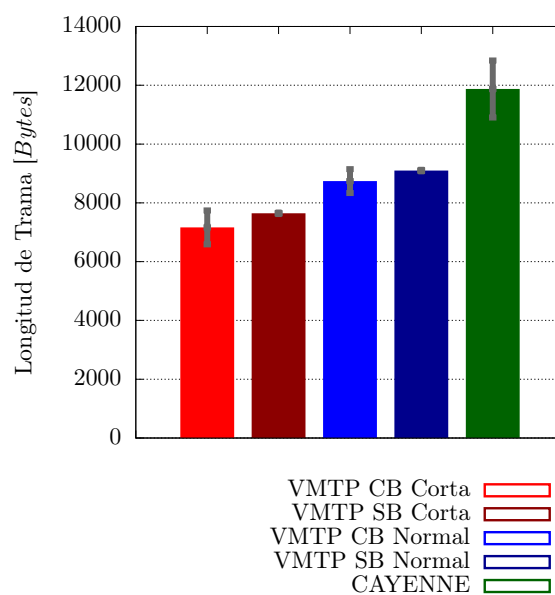


Figura 5.5: Total de bytes enviados usando las diferentes configuraciones VMTP y LoRaWAN en la capa LoRaWAN.

### 5.3. Consumo de datos

El tamaño de la información de los datos de prueba facilitados por el [PROMAS](#), es representada por los paquetes [LoRaWAN](#), la trama [VMTP](#) y el encapsulado [JSON](#) tiene un tamaño de 75759 bytes por día, utilizando el protocolo [VMTP](#) con la carga útil corta. Como se analizó en la Sección 5.2 con esta configuración se obtiene la mayor compresión de los datos.

El consumo total de bytes se obtuvo a partir de las dimensiones de trama que se enviaron por medio del módulo GSM SIM900 y con la comprobación del consumo de datos de la tarjeta [SIM](#) utilizada en este trabajo. Finalmente se realiza la estimación para un mes, para tener una idea general del consumo de datos a largo plazo, por lo que tenemos:

$$\frac{\text{Consumo}}{\text{mes}} = \frac{\text{Consumo}}{\text{dia}} \cdot 30 = 75759 \cdot 30 = 2,27 \text{ [MBytes]} \quad (5.1)$$

### 5.4. Consumo energético

Para el análisis del consumo energético se utiliza la metodología propuesta en [46]. El método consiste en realizar una extrapolación lineal para determinar el consumo energético (mA) que se usa por cada byte enviado, usando un factor de ensanchamiento (SF) de 7 y una tasa de código (CR) de 3, los cuales son los valores utilizados en este trabajo. En [46] se realiza el envío de 242 bytes, y especifica que para SF:7 y CR:6 realizando una transmisión ascendente se tarda 199,8 ms y si se tiene SF:7 y CR:5 se tarda 399,6 ms. Con esto, usando la extrapolación se tiene que para SF:7 y CR:3, tardaría alrededor de 799,2 ms.

Si para SF:7 y CR:3 enviando 242 bytes se tarda 799,2 ms, entonces para un byte se obtiene 3,30248 ms. En [46], plantea que mediante la transmisión ascendente el módulo genera un consumo energético de 83,0 mA, que en este caso corresponde a 799,2 ms. De este modo, para 3,30248 ms se tendría un consumo energético de 0,34298 mA.

Si para un byte se tiene un consumo energético de 0,34298 mA, en la Figura 5.6 se muestra las variaciones del consumo energético total de las diferentes configuraciones [VMTP](#) y Cayenne.

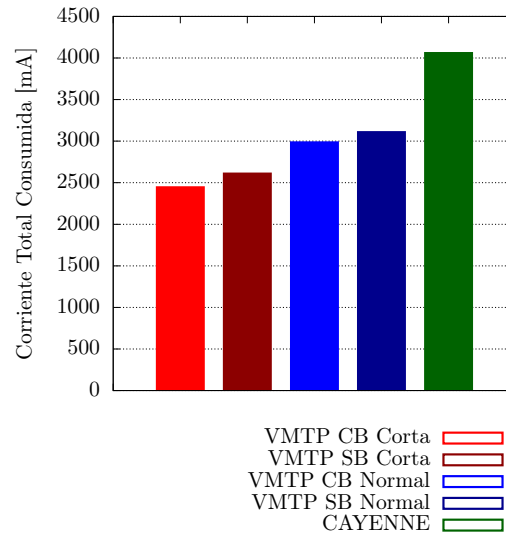


Figura 5.6: Corriente total consumida de las distintas configuraciones [VMTP](#) y Cayenne.

## 5.5. Conclusiones

Se configuraron los parámetros de transmisión de tal forma que los nodos y el *gateway* se comuniquen correctamente. Además, se observó que el tiempo mínimo de intervalo de envío de datos es 4 segundos los cuales permiten una transmisión de datos correcta y sin pérdidas. Finalmente, se parametrizó la aplicación en el servidor para observar correctamente los datos de las variables meteorológicas.

Como se muestra en las Figuras [5.2](#) y [5.4](#) el valor promedio con el uso de las banderas es menor al valor promedio sin el uso de éstas. Se concluye que la implementación del protocolo [VMTP](#) puede comprimir los datos eficientemente, y además brinda el control sobre éstas. Según los resultados de desviación estándar se observa que la trama [VMTP](#) produce variaciones en la longitud de los datos, dichas variaciones son las que permiten la compresión de datos.

De acuerdo a la Figura [5.6](#), se concluye que el mayor ahorro de consumo energético es del 39.65 % al usar la carga útil de paso con banderas ([VMTP](#) CB Paso), en comparación con la carga útil de Cayenne. En cuanto al consumo energético de la carga útil normal sin banderas ([VMTP](#) SB Normal) en relación con Cayenne existe un 23.35 % de ahorro energético.





## Capítulo 6

# Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones globales del trabajo realizado, así como la interpretación de los resultados, las limitaciones que se encontraron en el proceso, y finalmente, se proponen maneras de ampliar la investigación a futuro.

### 6.1. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente trabajo permitieron verificar que la transmisión de datos en función a los programas desarrollados están preconfigurados y programados de manera precisa. La implementación de la red permitirá la transmisión de los datos meteorológicos provenientes de varias estaciones mediante la utilización del protocolo [LoRaWAN](#) basado en la tecnología [LoRa](#). Una de las principales características del trabajo, es que todos los usuarios desde cualquier ubicación puedan acceder a la aplicación desarrollada y observar los datos meteorológicos que han sido almacenados en el servidor de la Universidad de Cuenca. Los programas realizados facilitan el envío de datos de forma comprimida y segura a través de las técnicas de encriptación y detección de errores ([AES-128](#)) que usa [LoRaWAN](#).

La información que se transmite al *gateway* es retransmitida usando tecnología [GSM/GPRS](#), debido a que la cobertura [WiFi](#) en zonas rurales es inferior a la que se obtiene en zonas urbanas. Por este motivo, se agregó el soporte para la tecnología [GSM/GPRS](#) en [LoRaWAN](#) para LoPy.

Existen diversos parámetros que se deben ajustar para poder lograr un gran alcance con los dispositivos [LoRa](#) tales como la ganancia de la antena, la elección de la potencia de transmisión o la velocidad de codificación. Además, se deben configurar diferentes parámetros para establecer la comunicación con la aplicación como son: claves de red, de aplicación y de seguridad, la región, la [MAC](#) del *gateway*, entre otras.

La carga útil de las variables meteorológicas se desarrolló de tal forma que se envíen todas las variables, minimizando la cantidad de bits. Se observó que el número de bits designado para cada variable, pudo satisfacer su rango debido a la holgura que se añadió a cada una de ellas.



Además, se concluye que las banderas de control implementadas juegan un papel crucial para la compresión de los datos, haciendo que la longitud de la trama sea variable dependiendo de sus valores en cero.

En cuanto a las pruebas obtenidas del trabajo, se obtuvieron buenos resultados en la compresión de datos. Esto fue, debido a que se realizó transmisiones usando la trama [VMTP](#) con diferentes tipos de carga útil, usando el modo corto y con la manipulación de las banderas. Con el protocolo desarrollado se logró reducir en un 33.3 % el total de bytes transmitidos.

## 6.2. Recomendaciones

Se está usando el módulo LoPy versión 1.0 por lo que es necesario implementar adicionalmente un módulo [GSM/GPRS](#); sin embargo se podría usar un módulo FiPy. Este dispone de un lector de nano tarjeta [SIM](#) que ofrece opciones de proveedor de red móvil.

Se recomienda realizar un estudio del área geográfica donde se desplegaría la red de nodos, para optimizar los parámetros de configuración [LoRaWAN](#) de la red.

## 6.3. Trabajos futuros

Durante el desarrollo del trabajo surgieron varios temas en los cuales se podrían trabajar en un futuro.

Implementar multisalto en la arquitectura [LoRaWAN](#) y acoplarla en la red planteada en este proyecto.

Mejorar la robustez del almacenamiento de los datos, guardando la información en una base de datos dedicada para la arquitectura usada.

Realizar un estudio de probabilidades de la concurrencia a cero de las variables hidrometeorológicas, para una mejor compresión de datos.

Realizar la comunicación en tiempo real y automática entre los módulos LoPy y las estaciones meteorológicas. Además el manejo de múltiples estaciones mediante un número de identificación desde un solo módulo LoPy.



# Anexos



## Apéndice A

# Configuración de dispositivos

### A.1. Instalación y configuración del servidor LoRaWAN

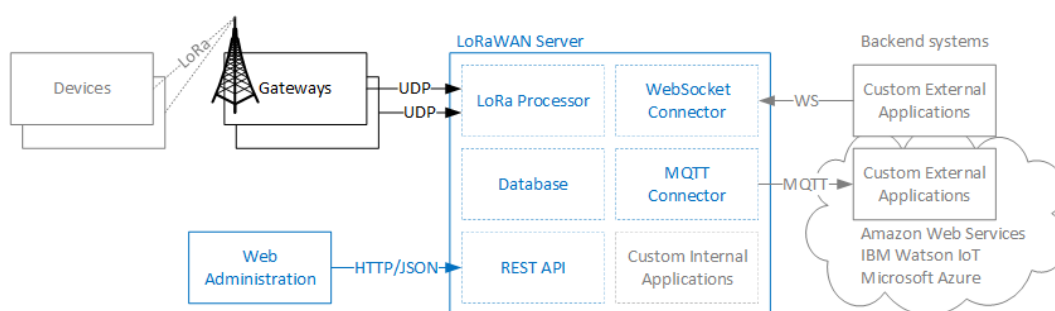


Figura A.1: Principales componentes del servidor LoRaWAN [1].

#### A.1.1. Instalación

Para iniciar la instalación del servidor se debe primero descargar e instalar Erlang/OTP en su versión 19 o 20 (la versión 21 aún no es compatible). Dicho programa puede descargarse de la siguiente página web: <http://www.erlang.org/downloads/>

El servidor puede instalarse en diferentes sistemas operativos, pero en este caso se instala en el SO Ubuntu. Se procede a descargar el archivo *lorawan-server-\*.tar.gz* de la siguiente página web: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server/releases>. Se lo descomprime de la siguiente manera desde el terminal:

```
$ sudo mkdir lorawan-server
$ sudo mv lorawan-server- < VERSION > .tar.gz lorawan-server /
$ sudo cd lorawan-server
$ sudo tar -zxvf lorawan-server- < VERSION > .tar.gz
```



De esta manera se completa la instalación. En la Figura A.2 se aprecia el servidor en ejecución. Para la ejecución del servidor se lo hace con:

```
$ sudo bin/lorawan-server
```

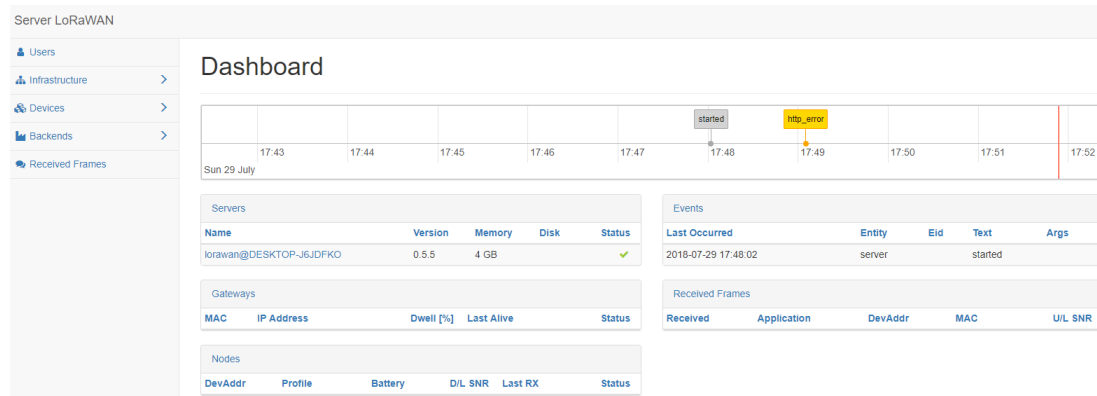


Figura A.2: Servidor LoRaWAN en ejecución.

### A.1.2. Configuración del servidor

Para realizar la configuración del servidor se debe revisar la siguiente dirección: *lorawan-server/releases/ < VERSION > /sys.config*. Tenga en cuenta que durante la instalación manual el fichero *sys.config* (véase el Listado A.1), se crea automáticamente mediante la herramienta de lanzamiento (*release*) basada en *lorawan\_server.config*.

Listado A.1: Configuración del servidor *sys.config*.

```
[{ lorawan_server, [
    % actualiza esta lista para agregar/eliminar aplicaciones
    { aplicaciones, [
        {<< "semtech-mote" >>, lorawan_application_semtech_mote}},
    % puerto UDP escucha los paquetes del gateway packet_forwarder
    { packet_forwarder_listen, [{port, 1680}]}, el
    % puerto HTTP para administracion web y API REST
    { http_admin_listen, [{puerto, 8080}]},
    % nombre de usuario y clave para la interfaz de administrador
    { http_admin_credentials, {<< "admin" >>, << "administracion" >>}},
    % cantidad de rxframes retenidos para cada dispositivo/nodo
    { retained_rxframes, 50},
    % caducidad de websocket si el cliente no envia datos
    { websocket_timeout, 3600000}
    ]},
```

```
{ os_mon, [  
    % Establecer este parametro en verdadero puede ser necesario en  
    % sistemas integrados con versiones reducidas de herramientas Unix  
    { disksup_posix_only, false }  
]]}.
```

En el archivo *sys.config* el cual se muestra en el Listado A.1, se puede modificar el puerto UDP, el puerto HTTP, el nombre de usuario y contraseña de inicio de sesión del servidor y además, la aplicación predeterminada de *semtech-mote*.

## A.2. Configuración del *gateway*

El *gateway* se configura en el servidor: 1.- se abre el menú principal en la pestaña *Infrastructure*, 2.- se selecciona *gateways* y 3.- se da *click* en el botón *Create*, como se observa en la Figura A.3.

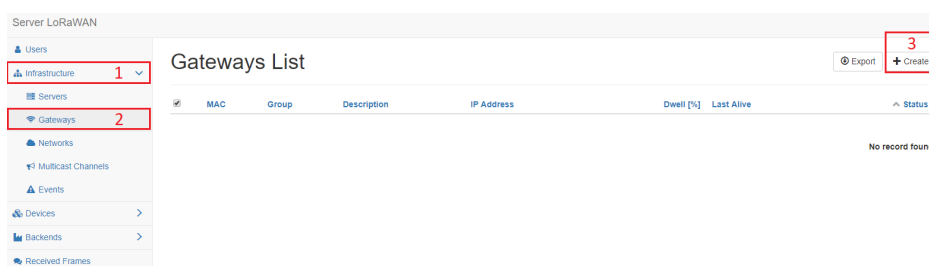


Figura A.3: Creación de un *gateway* en el servidor.

En la Figura A.4 se puede observar los parámetros utilizados.

- **MAC:** Dirección MAC del LoPy, como se explicó en la Sección 4.1.1
- **Group:** Nombre del grupo de trabajo.
- **TX Chain:** La cadena TX identifica la “cadena de radio” del *gateway* utilizada para los enlaces descendentes (generalmente 0).
- **Antenna Gain (dBi):** La ganancia de antena (dBi) se puede configurar para garantizar que la ganancia de transmisión + potencia de la antena esté por debajo del **Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (EIRP)** máxima permitida para la región dada.
- **Description:** Descripción para su conveniencia.
- **Location:** Ubicación y altitud del *gateway*.


|                    |  |
|--------------------|--|
| MAC *              | 240AC4FFFE0245F0   |
| Group              | LoRaWAN  |
| TX Chain *         | 0  |
| Antenna Gain (dBi) | 2  |
| Description        |  |
| Location *         |  |
| Altitude           | 2535   |

Figura A.4: Configuración de un *gateway* en el servidor.

### A.3. Configuración de la red LoRaWAN

La red **LoRaWAN** se configura en el menú principal en la sección *Infrastructure*, se selecciona *Networks* y se da *click* en el botón *Create*, de la misma manera como se creó el *gateway*, se puede apreciar dicha sección e la Figura A.3.

Para crear una red se necesita configurar las 3 secciones que son: *General*, *ADR* y *Channels*. Los valores que ingresamos para la configuración depende de la región de trabajo, como nuestra región corresponde a (US 902-928 MHz) se colocaron los valores que se observa a continuación:

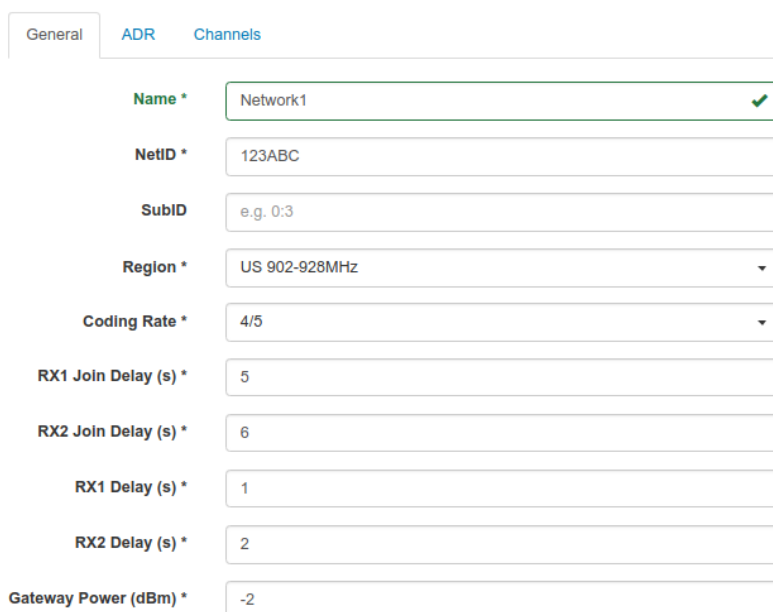
#### Configuración de la sección General

En la Figura A.5 se observan los parámetros utilizados.

- **Name:** Nombre de la red **LoRaWAN**.
- **NetID:** Identificación de la red privada.
- **SubID:** Tamaño específico de los *bits* fijos (opcional).
- **Region:** Región que determina los parámetros **LoRaWAN** (US 902-928 MHz).
- **Coding Rate:** La velocidad de codificación, siempre es 4/5.
- **RX1/RX2 Join Delay (s):** El retraso de emparejamiento entre el final de TX y la primera o segunda ranura de recepción, define el *JOIN\_ACCEPT\_DELAY1* y *JOIN\_ACCEPT\_DELAY2*.
- **RX1/RX2 Delay (s):** El retraso entre el final de TX y la primera o segunda ranura de recepción, define el *RECEIVE\_DELAY1* y *RECEIVE\_DELAY2*



- **Gateway Power (dBm):** Define una potencia de transmisión predeterminada para los enlaces descendentes.



The screenshot shows a configuration interface with three tabs: 'General', 'ADR', and 'Channels'. The 'General' tab is active. It contains the following fields:

| Field                 | Value         |
|-----------------------|---------------|
| Name *                | Network1      |
| NetID *               | 123ABC        |
| SubID                 | e.g. 0:3      |
| Region *              | US 902-928MHz |
| Coding Rate *         | 4/5           |
| RX1 Join Delay (s) *  | 5             |
| RX2 Join Delay (s) *  | 6             |
| RX1 Delay (s) *       | 1             |
| RX2 Delay (s) *       | 2             |
| Gateway Power (dBm) * | -2            |

Figura A.5: Configuración de la sección general de una red LoRaWAN.

### Configuración de la sección ADR

En la Figura A.6 se observan los parámetros utilizados.

- **Max PIRE (dBm):** el EIRP máximo permitido para la región dada.
- **Max Power:** Máxima potencia (dB).
- **Min Power:** Mínima potencia (dB).
- **Max Data Rate:** Velocidad máxima de datos.
- **Initial RX1 DR Offset:** Define el desfase entre la velocidad de datos del enlace ascendente y la velocidad de datos del enlace descendente, es utilizada para comunicarse con el dispositivo final en la primera ranura de recepción (RX1).
- **Initial RX2 DR:** Define la velocidad de datos para la segunda ranura de recepción RX2.
- **Initial RX2 Freq (MHz):** Define la frecuencia predeterminada en la ventana de recepción RX2.

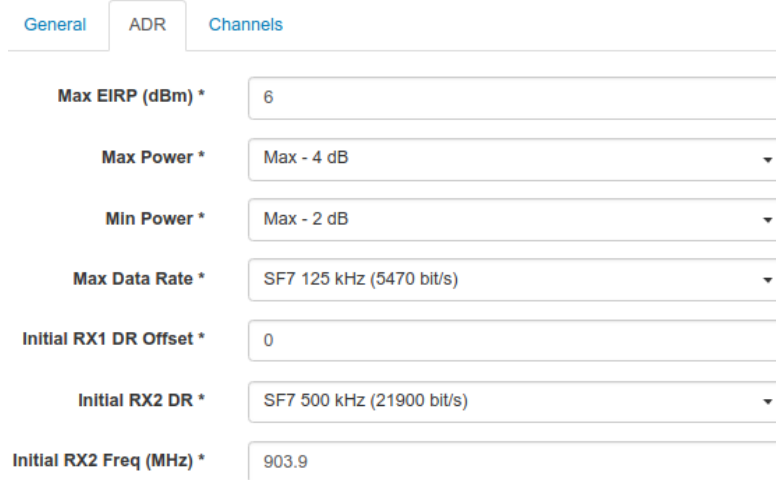


Figura A.6: Configuración de la sección ADR de una red LoRaWAN.

### Configuración de la sección Channels

En la Figura A.7 se observan los parámetros utilizados.

- **Initial Channels:** Habilitados en los dispositivos. Este puesto incluye una lista de intervalos separados por comas, por ejemplo, 0-2 para UE o 0-71 para EE. UU.
- **Channels:** definen una lista de canales adicionales enviados al dispositivo durante la combinación.
  - La frecuencia (MHz), define la frecuencia del canal.
  - Velocidad mínima, define la velocidad de datos más baja permitida en este canal. Si no se especifica, es igual a 0.
  - Velocidad máxima, define la velocidad de datos más alta permitida en este canal. Si no se especifica, es igual al valor global en la pestaña ADR .

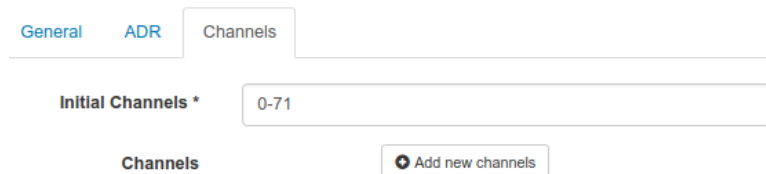


Figura A.7: Configuración de la sección *channels* de una red LoRaWAN.

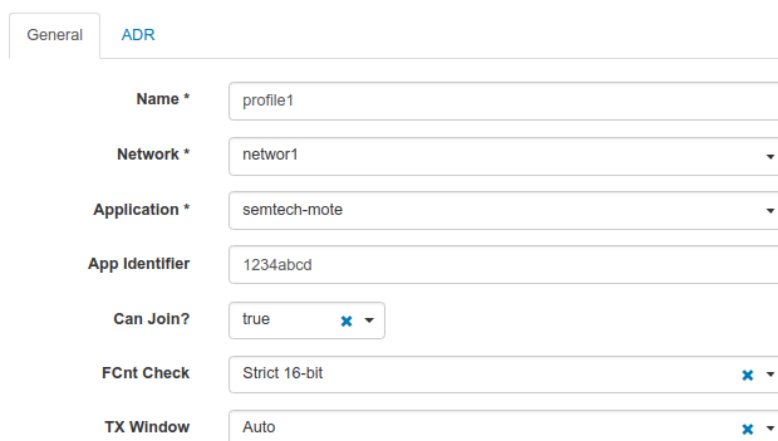
## A.4. Configuración de un perfil en LoRaWAN

Un perfil **LoRaWAN** se configura en el menú principal en la sección *Devices*, se selecciona *Profiles* y se da click el botón *Create*, de la misma manera como se creó el *gateway*. Para crear una red se necesita configurar 2 secciones que son: *General* y *ADR*. El perfil representa un *hardware* en particular y todas las configuraciones estáticas son comunes para un grupo de dispositivos. A continuación se presenta la configuración de cada sección.

### Configuración de la sección General

En la Figura A.8 se observan los parámetros utilizados.

- **Name:** Nombre del perfil **LoRaWAN**.
- **Network:** Nombre de la red al que pertenece los dispositivos con este perfil.
- **Application:** Aplicación que los dispositivos están usando.
- **App Identifier:** Es una identificación de aplicación personalizada.
- **FCnt Check:** Para ser utilizado para este dispositivo:
  - Estricto de 16 *bits* o estricto de 32 *bits*, indican un contador estándar compatible.
  - Restablecer en cero, permite a los dispositivos personalizados restablecer el contador. Esto debilita un poco la seguridad del dispositivo ya que son posibles más ataques de respuesta.
  - Deshabilitado, desactiva la comprobación de dispositivos defectuosos. Esto destruye la seguridad del dispositivo.
- **TX Window:** se utiliza para enlaces descendentes a este dispositivo:
  - Automático: para elegir la opción factible más temprana, ya sea RX1 o RX2
  - RX1: para usar siempre la primera ventana de RX
  - RX2: para usar siempre la segunda ventana de RX



The screenshot shows the 'General' configuration tab for a LoRaWAN profile. The interface includes a header with 'General' and 'ADR' tabs. Below the header, there are several configuration fields:

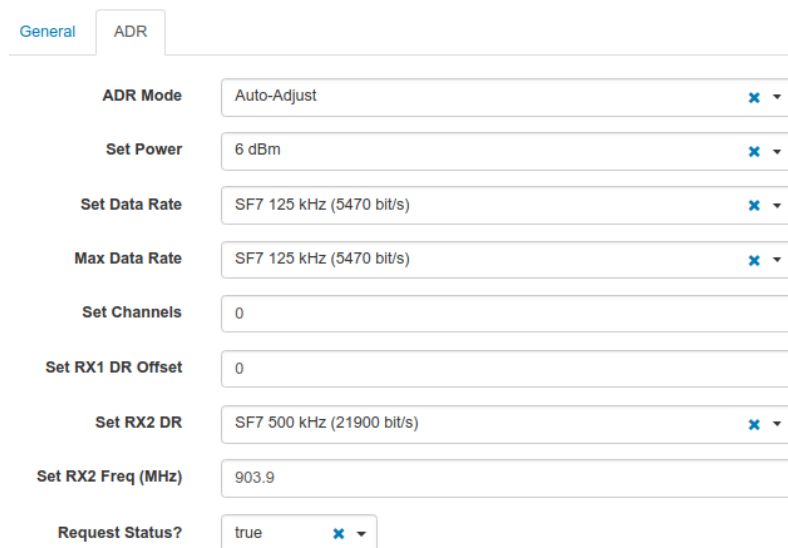
| Field          | Value         |
|----------------|---------------|
| Name *         | profile1      |
| Network *      | networ1       |
| Application *  | semtech-mote  |
| App Identifier | 1234abcd      |
| Can Join?      | true          |
| FCnt Check     | Strict 16-bit |
| TX Window      | Auto          |

Figura A.8: Configuración de la sección general de un perfil **LoRaWAN**.

## Configuración de la sección ADR

En la Figura A.9 se observan los parámetros utilizados.

- **ADR Mode:** Determina el mecanismo de ADR para este dispositivo: desactivado, autoajustado o mantenido.
- **Set Power:** Define la potencia (dBm).
- **Set Data Rate:** Define la velocidad de datos.
- **Max Data Rate:** Define la tasa de datos máxima admitida por los dispositivos.
- **Set Channels:** Define el conjunto de canales. Los canales se presentan como una lista de interfaces separadas por comas.
- **Set RX1 DR Offset:** Define el desplazamiento entre las velocidades de datos de enlace descendente de enlace ascendente y RX1
- **Set RX2 DR:** Define la velocidad de datos para la segunda ranura de recepción RX2.
- **Set RX2 Freq (MHz):** Define la frecuencia predeterminada en la ventana de recepción de RX2.



| Parameter          | Value                     |
|--------------------|---------------------------|
| ADR Mode           | Auto-Adjust               |
| Set Power          | 6 dBm                     |
| Set Data Rate      | SF7 125 kHz (5470 bit/s)  |
| Max Data Rate      | SF7 125 kHz (5470 bit/s)  |
| Set Channels       | 0                         |
| Set RX1 DR Offset  | 0                         |
| Set RX2 DR         | SF7 500 kHz (21900 bit/s) |
| Set RX2 Freq (MHz) | 903.9                     |
| Request Status?    | true                      |

Figura A.9: Configuración de la sección ADR de un perfil LoRaWAN.

## A.5. Configuración de activación de un nodo por personalización

Con esta configuración, se puede hacer uso inmediato del servidor. Esta configuración hace uso de ABP utilizando direcciones preconfiguradas. Para hacer uso de esto se debe acceder a

la pestaña *Devices* y dar *click* en la opción *Activated Nodes* y finalmente dar click en el botón *Create*.

En la Figura A.10 se observan los parámetros utilizados.

- **DevAddr \***: Código de aplicación del nodo.
- **Profile \***: Perfil que este nodo usa.
- **App Arguments**: Es una cadena opaca con configuraciones específicas de la aplicación.
- **NwkSKey and AppSKey**: Claves de red y aplicación.
- **FCnt Up and Down**: Contadores de trama.
- **Last Reset**: Indica la hora de la última unión o reinicio.
- **Last RX**: Indica la hora del último fotograma de enlace ascendente.



|               |  |
|---------------|--|
| DevAddr *     | <input type="text" value="26021424"/>  |
| Profile *     | <input type="text" value="profile1"/>  |
| App Arguments | <input type="text" value="lora"/>  |
| NwkSKey *     | <input type="text" value="81113288D3CC0396E272C1820A07E33B"/>  |
| AppSKey *     | <input type="text" value="F25CA1A2711CAD95B7BF87E132BF39F0"/>  |
| FCnt Up       | <input type="text" value="110"/>   |
| FCnt Down *   | <input type="text" value="0"/>   |
| Last Reset    | <input type="text" value=""/>                     |
| Last RX       | <input type="text" value="2018-06-29 17:27:16"/>  |

Figura A.10: Configuración de activación de un nodo por personalización



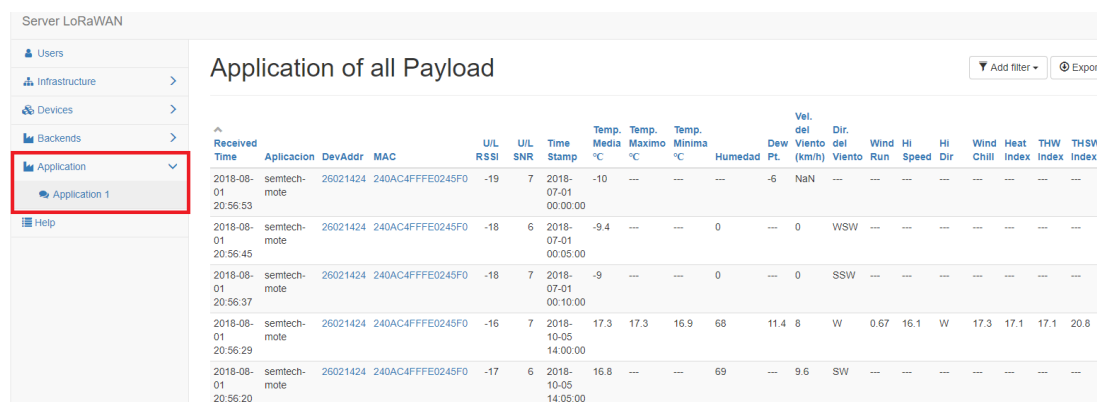
## Apéndice B

# Desarrollo de la aplicación en el servidor

Este apéndice describe la aplicación donde se visualizarán las variables meteorológicas en el servidor [LoRaWAN](#), además se presentan las herramientas utilizadas para decodificar la carga útil [LoRaWAN](#) y visualizar los datos que generan las estaciones del [PROMAS](#).

### B.1. Descripción de la aplicación

La aplicación que se desarrolló tiene como función principal la visualización de todas las variables de las estaciones meteorológicas. La aplicación se desarrolló en *JavaScript*. En la Figura B.1 se visualiza la aplicación.



| Received Time       | Aplicacion   | DevAddr  | MAC              | U/L RSSI | U/L SNR | Time Stamp          | Temp. Media °C | Temp. Maximo °C | Temp. Minima °C | Humedad | Dew Pt. | Vel. del Viento (km/h) | Dir. del Viento | Wind Run | Hi Speed | Hi Dir | Wind Chill | Heat Index | THW  | THSW |
|---------------------|--------------|----------|------------------|----------|---------|---------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------|---------|------------------------|-----------------|----------|----------|--------|------------|------------|------|------|
| 2018-08-01 20:56:53 | semtech-mote | 26021424 | 240AC4FFFE0245F0 | -19      | 7       | 2018-07-01 00:00:00 | -10            | ---             | ---             | ---     | -5      | NaN                    | ---             | ---      | ---      | ---    | ---        | ---        | ---  | ---  |
| 2018-08-01 20:56:45 | semtech-mote | 26021424 | 240AC4FFFE0245F0 | -18      | 6       | 2018-07-01 00:05:00 | -9.4           | ---             | ---             | 0       | ---     | 0                      | WSW             | ---      | ---      | ---    | ---        | ---        | ---  | ---  |
| 2018-08-01 20:56:37 | semtech-mote | 26021424 | 240AC4FFFE0245F0 | -18      | 7       | 2018-07-01 00:10:00 | -9             | ---             | ---             | 0       | ---     | 0                      | SSW             | ---      | ---      | ---    | ---        | ---        | ---  | ---  |
| 2018-08-01 20:56:29 | semtech-mote | 26021424 | 240AC4FFFE0245F0 | -16      | 7       | 2018-10-05 14:00:00 | 17.3           | 17.3            | 16.9            | 68      | 11.4    | 8                      | W               | 0.67     | 16.1     | W      | 17.3       | 17.1       | 17.1 | 20.8 |
| 2018-08-01 20:56:20 | semtech-mote | 26021424 | 240AC4FFFE0245F0 | -17      | 6       | 2018-10-05 14:05:00 | 16.8           | ---             | ---             | 69      | ---     | 9.6                    | SW              | ---      | ---      | ---    | ---        | ---        | ---  | ---  |

Figura B.1: Aplicación en el servidor.

## B.2. Decodificación de paquetes LoRaWAN

Para la decodificación de paquetes [LoRaWAN](#) en la aplicación, se usa el lenguaje de programación Erlang. Debido a que el servidor está implementado en dicho lenguaje. A continuación se muestran las funciones implementadas y su objetivo.

### **init(App)**

*init/1* invoca a la inicialización del servidor. Esto se hace para devolver cualquiera ok o una tupla  $\{ok, PathsList\}$  para definir URIs específicos de la aplicación.

### **handle\_join({Network, Profile, Device}, {MAC, RxQ}, DevAddr)**

*handle\_join/3* se invoca cuando un nuevo nodo se une a la red. La función devolverá cualquiera ok o  $\{error, error\_description\}$ .

### **handle\_uplink(Network, Profile, Node, MAC, RxQ, LastMissed, Frame)**

*handle\_uplink/4* solicita la primera recepción de una trama [LoRaWAN](#) (antes de la deduplicación):

- Parámetros de red donde el nodo está operando.
- Perfil del nodo.
- Configuración del nodo.
- [MAC](#) del *gateway* que recibió este marco por primera vez.
- RxQ con calidad de recepción del primer *gateway*.
- *LastMissed* puede ser  $\{omitido, recibo\}$  cuando se confirmó el último enlace descendente y se perdió.
- *Frame* es el registro `#frame {}` con: fcnt, número de puerto y datos binarios.

### **handle\_rrxq({Network, Profile, Node}, Gateways, WillReply, Frame, State)**

*handle\_rrxq/5* llama a la opción después de recibir la trama de todos los *gateways* (después de la deduplicación):

- Parámetros de red donde el nodo está operando.
- Perfil del nodo.
- Configuración del nodo.
- *Gateways* que recibe la trama, ordenados según RSSI que es una lista de tuplas  $\{MAC, RxQ\}$ , donde:
  - [MAC](#) del *gateway* que recibió la trama.
  - RxQ con calidad de recepción en este portal.
- WillReply indica que la [MAC](#) está a punto de responder al dispositivo, incluso si la aplicación no envía datos.
- Frame es el registro `#frame {}`
- Estado recibido de *handle\_uplink/4*

El indicador *WillReply* permite a la aplicación enviar datos cuando una trama de enlace descendente necesita ser transmitida de todos modos debido a una decisión de capa [MAC](#).



**handle\_delivery({Network, Profile, Node}, Result, Receipt)**

*handle\_delivery/3* ejecuta la llamada después de la entrega exitosa o fallida de un fotograma de enlace descendente confirmado:

- Parámetros de red donde el nodo está operando.
- Perfil del nodo.
- Configuración del nodo.
- *Result* puede ser: entregado ó perdido.
- *Receipt* es el valor incluido en el enlace descendente *#txdata*.

### B.3. Decodificación de la carga útil de las variables meteorológicas

Los diagramas de flujo que se presenta a continuación, fue desarrollado en *JavaScript* y su objetivo es decodificar la marca de tiempo, la carga útil de las variables meteorológicas y la visualización de cada variable en la aplicación.

#### B.3.1. Función para decodificar la marca de tiempo

Esta función se encarga de extraer el byte menos significativo de la marca de tiempo del servidor, dicho byte hace referencia al año y mes de la fecha. Una vez que tenemos dicho byte, procedemos a decodificar la marca de tiempo de las variables meteorológicas que representan los últimos 3 bytes para formar la marca de tiempo completo. Para realizar dicho proceso se baso en el formato *Unix Epoch* ya que este formato expresara la hora y fecha en 4 bytes. En la Figura B.2 se observa el diagrama de flujo de la función antes mencionada.

#### B.3.2. Función para decodificar las variables meteorológicas

Esta función se encarga de la decodificación de las variables meteorológicas, véase la Figura B.3 se observa que se analiza la trama completa de datos:

- Se agrega '-' cuando `bandera[0]==0`
- Se agrega '0' cuando `bandera[0]==1`
- Si no cumple ninguna de las anteriores, quiere decir que llega el dato de la trama y no es necesario agregar nada a la trama.

De igual manera se analiza para el caso de la carga útil de paso, el diagrama de flujo visualiza solo las banderas de las variables.

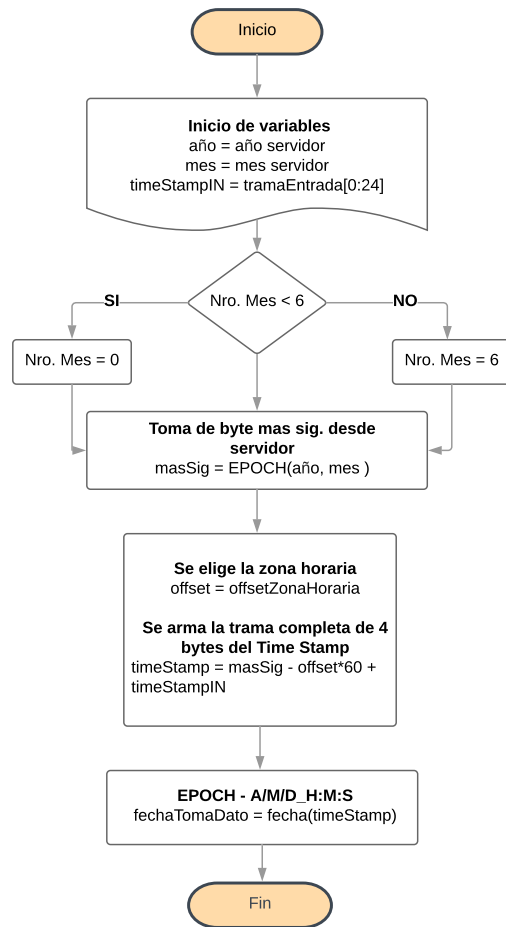


Figura B.2: Diagrama de flujo: función de la decodificación de la marca de tiempo.

### B.3.3. Función para visualizar las variables meteorológicas

Esta función se encarga de la visualización de las variables meteorológicas en la aplicación dentro del servidor, véase la Figura B.4.

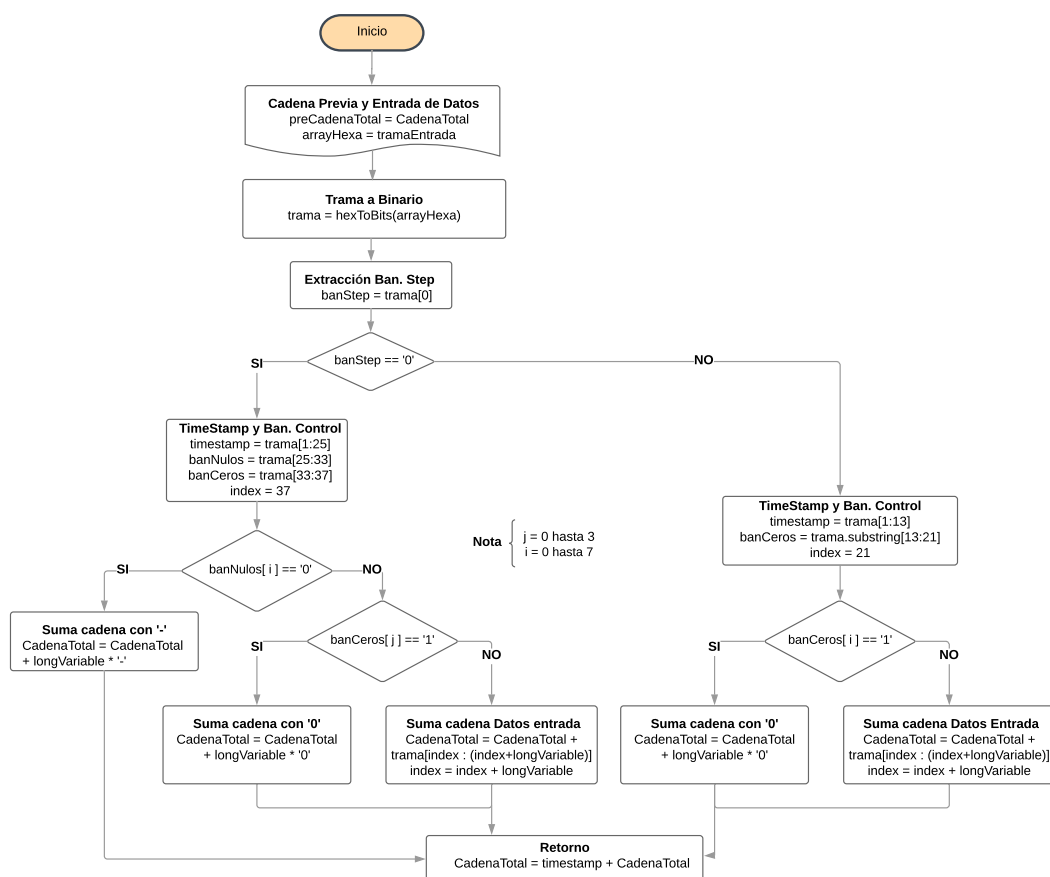


Figura B.3: Diagrama de flujo: función de la decodificación de las variables meteorológicas.

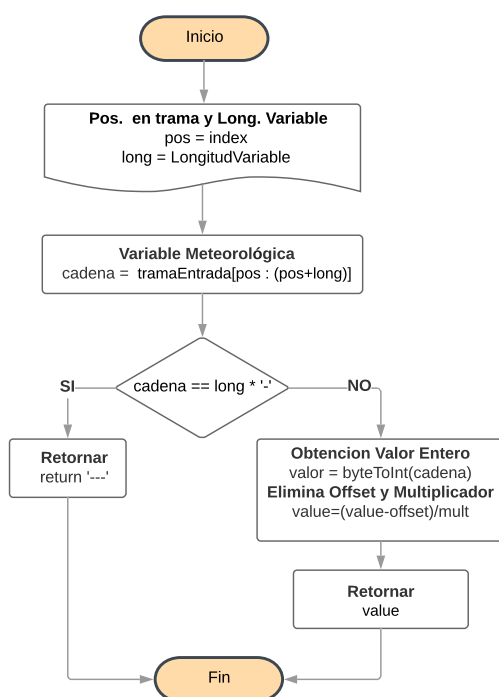


Figura B.4: Diagrama de flujo: función de visualización de las variables meteorológicas.



## Apéndice C

# Funciones de la implementación del GPRS SIM 900 con el *gateway*

Este apéndice describe las siguiente funciones utilizadas en Python para la configuración y conexión del módulo GPRS SIM 900: los requisitos de la tarjeta [SIM](#) de la operadora móvil, las funciones del puerto serial en la comunicación y los comandos AT usados para toda la configuración.

### C.1. Función para inicializar el módulo GPRS SIM 900

Esta función se encarga de la comunicación serial e inicialización del módulo GPRS SIM 900. Además, se envían comandos AT para confirmar que se inicializado correctamente el módulo GPRS. En la Figura [C.1](#) se visualiza el diagrama de bloques y los comandos AT que se usaron.

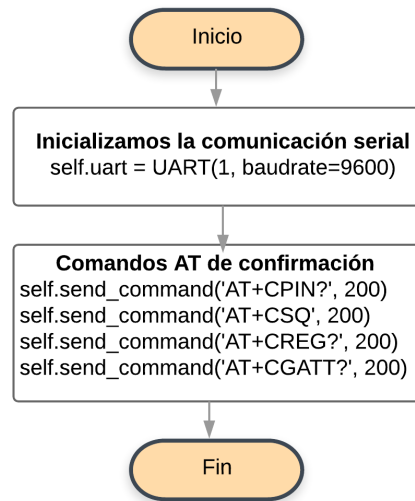


Figura C.1: Diagrama de flujo: función de inicialización el módulo GPRS SIM 900.

## C.2. Función para configurar el servidor NTP con el módulo GPRS SIM 900

Esta función se encarga de la configuración y conexión con el servidor [NTP](#). Esta configuración se realiza mediante comandos AT, se envía el usuario, contraseña y región del servidor [NTP](#). Una vez configurado se sincronizan los tiempos y se envía la petición de vinculación como se observa en la Figura [C.2](#).

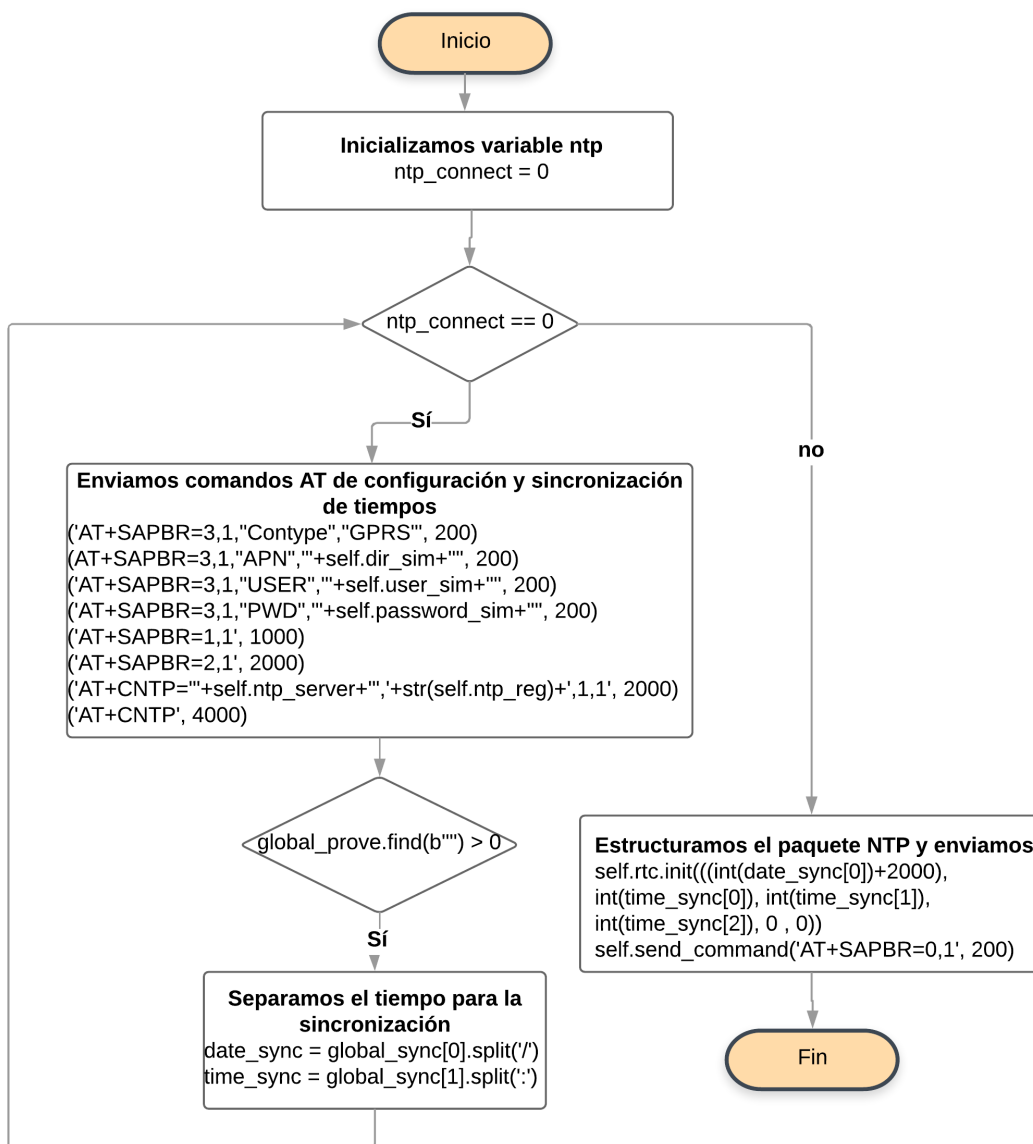


Figura C.2: Diagrama de flujo: función de configuración del servidor NTP.

### C.3. Función para conectar el módulo GPRS SIM 900 con la operadora móvil

Esta función se encarga de la configuración y conexión del módulo GPRS con la [SIM](#) de la operadora móvil. La cual se debe conocer el usuario y contraseña de la operadora móvil que se utilice. Finalmente se envía mediante comandos AT su configuración, véase la [Figura C.3](#).

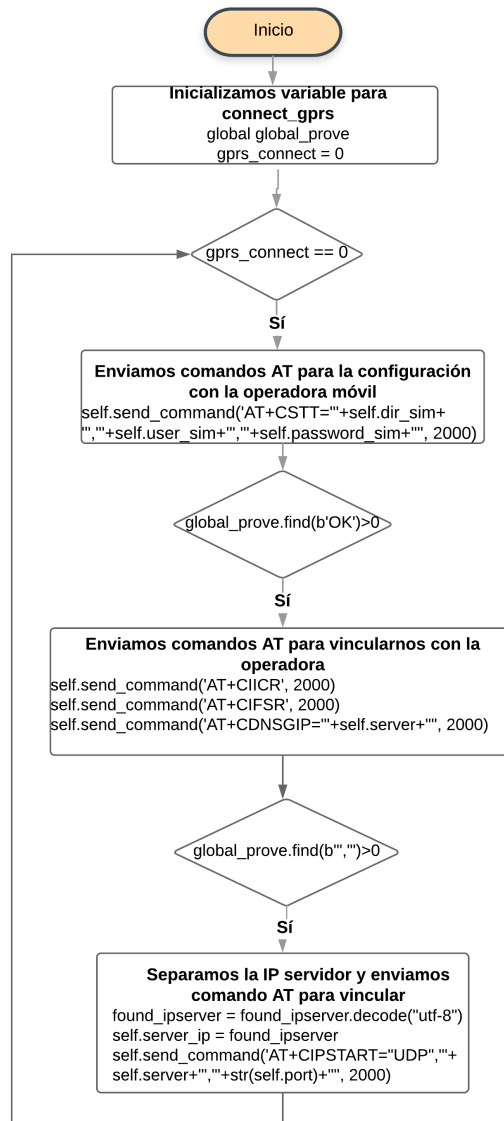


Figura C.3: Diagrama de flujo: función para conectar el módulo GPRS SIM 900 con el *gateway*.

### C.3.1. Función para enviar comandos

Esta función se encarga de enviar todos los comandos AT mediante el puerto serial, se coloca un retardo para esperar y enviar. Véase la Figura C.4.

### C.3.2. Función para enviar mensajes

Esta función se encarga de abrir el puerto serial, esperar y enviar mensajes. Véase la Figura C.5.



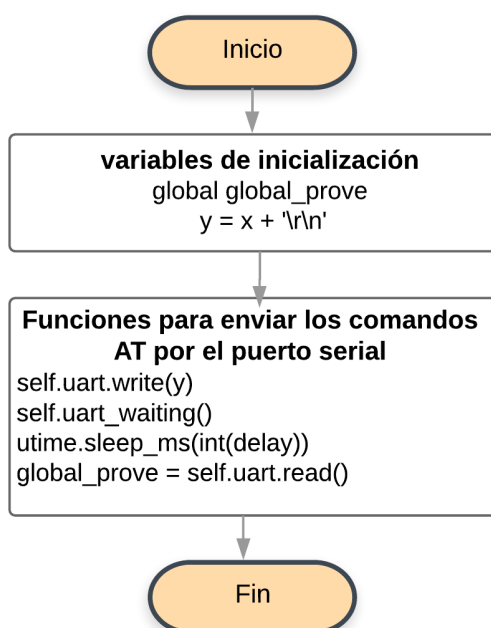


Figura C.4: Diagrama de flujo: función para enviar comandos AT por el puerto serial.

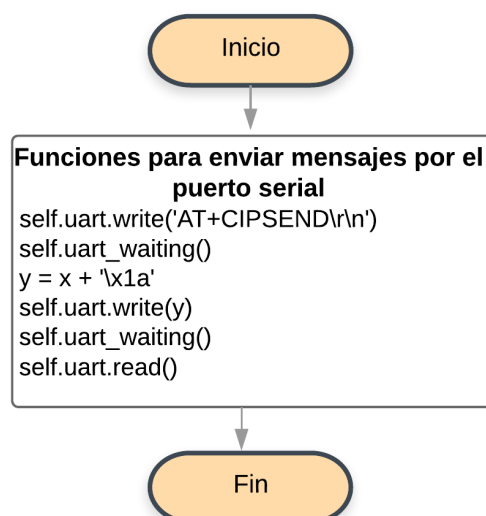


Figura C.5: Diagrama de flujo: función para enviar mensajes por el puerto serial.

## C.4. Conexión UDP usando comandos AT

El proceso de establecer una conexión UDP, se realiza de la siguiente manera:



AT+CGATT?

+CGATT: 1

OK

AT+CSTT="CMNET"

OK

AT+CIICR

OK

AT+CIFSR

10.77.65.18

AT+CIPSTART="UDP", "116.228.221.51", "9600"

CONNECT OK

AT+CIPSEND

> sim900 UDP test

SEND OK

// Los datos se han enviado desde  
el puerto serie, pero se desconoce  
si los datos llegan al servidor UDP.

UDP test

// Recibir datos del servidor remoto.

AT+CIPCLOSE

// Cierre la conexion UDP

CLOSE OK

Nota: para TCP, "SEND OK" significa que los datos han sido enviados y recibidos con éxito por el servidor remoto, debido al protocolo orientado a la conexión TCP; para UDP, "SEND OK" solo significa que los datos se han enviado desde el puerto serie del módulo, lo que no significa que los datos lleguen al servidor, debido al protocolo sin conexión UDP basado en mensajes más simple.



## C.5. Conexión con el servidor NTP usando comandos AT

Esta sección presenta los comando AT para realizar la conexión con el servidor [NTP](#) para SIM900. El módulo SIM900 NTP proporciona una solución de tiempo de red. A continuación se presenta un ejemplo de dicha conexión.

### C.5.1. Activación del perfil del portador

```
AT+SAPBR=3,1,"Contype","GPRS"    // Establecer parametro de portador
OK
```

```
AT+SAPBR=3,1,"APN","CMNET"
OK
```

```
AT+SAPBR =1,1                      // Activar el contexto del portador
OK
```

```
AT+SAPBR=2,1
+SAPBR: 1,1,"10.89.193.1"
OK
```

### C.5.2. Definición de parámetros NTP y obtención del tiempo de red

```
AT+CNTP="pool.ntp.org",8,1,2
OK
```

```
AT+CNTP
+CNTP: 1,"13/04/18,14:38:30"
OK
```

### C.5.3. Desactivación el perfil del portador

```
AT+SAPBR=0,1                      // Desactivar el contexto del portador
OK
```



## Apéndice D

# Características del hardware

En esta sección se detalla las especificaciones principales de los diferentes elementos de *hardware* utilizados en el presente proyecto.

### D.1. Módulo LoPy

#### Características

- Potente CPU, BLE y radio [WiFi](#) de última generación. Rango de 1KM [WiFi](#).
- También se puede duplicar como *gateway* [LoRa](#).
- MicroPython habilitado.
- Uso de energía ultrabajo: una fracción en comparación con otros microcontroladores conectados.

#### Tratamiento

- *Espressif ESP32 chipset*.
- Procesador dual + radio [WiFi](#) (Sistema en chip).
- El Procesador de red maneja la conectividad [WiFi](#) y la pila IPv6.
- El procesador principal es completamente gratuito para ejecutar la aplicación del usuario.
- Un coprocesador [Ultra Low Power \(ULP\)](#) adicional que puede monitorear GPIO, los canales ADC y controlar la mayoría de los periféricos internos durante el modo de sueño profundo mientras solo consume 25uA.

#### Frecuencias de operación

- 868 MHz (Europa) a + 14dBm como máximo.
- 915 MHz (América del Norte y del Sur, Australia y Nueva Zelanda) a un máximo de + 20dBm.

#### Especificación de rango



- Rango de nodos: hasta 40 km.
- *gateway*: hasta 22 km.
- Capacidad *gateway*: hasta 100 nodos.

#### Seguridad y Certificaciones

- Soporte SSL/TLS.
- Seguridad de la empresa WPA.
- FCC - 2AJMTLOPY2R.
- CE 0700.

#### Memoria

- RAM: 512 KB.
- Flash externo: 4 MB.
- Aceleración de punto flotante de hardware.
- Python multi-hilo.

#### Bluetooth

- Baja energía y clásico.

#### RTC

- Corriendo a 32 kHz.

#### Especificación **LoRa**

- Semtech **LoRa** transceptor SX1272.
- **LoRaWAN** stack.
- Dispositivos de clase A y C.

## D.2. Expansion Board

#### Características

- USB y batería LiPo
- FT234XD convertidor USB a serie
- Cargador de batería LiPo (BQ24040), con opciones para dos corrientes de carga diferentes (100mA y 450mA)
- TPS2115A con protección de voltaje inverso
- Ranura para tarjeta *MicroSD*
- Tres cabezales hembra para enchufar fácilmente WiPy 2.0, LoPy, SiPy, FiPy o GPy.
- Conector de batería de estilo JST
- LED de alimentación y LED de estado de carga
- Un LED de usuario y un interruptor de usuario
- Control de voltaje de batería a través del WiPy ADC
- Muchos puentes para habilitar/deshabilitar características



## D.3. Módulo GSM/GPRS SIM900

### Características

- SIM900 está diseñado con un procesador de un solo chip muy potente que integra el núcleo AMR926EJ-S
- Módulo de banda cuádruple [GSM/GPRS](#) 850/900/1800/1900 MHz
- *Dual-Band* 900/1900 MHz
- Módulo tipo [Surface Mount Technology \(SMT\)](#) para la aplicación del cliente
- Una potente pila de protocolos [TCP/IP](#) incrustados
- Clase móvil GPRS con ranuras múltiples clase 10/8GPRS clase B
- Conforme a la fase GSM 2/2 + Clase 4 (2W - 850/900 MHz)
- Clase 1 (1W - 1800/1900MHz)
- Control a través de comandos AT (GSM 07.07, 07.05 y *SIMCOM Enhanced AT Commands*)
- Bajo consumo de energía: 1.5mA (modo de reposo)
- Temperatura de funcionamiento: -40° C a +85° C







# Bibliografía

- [1] GitHub, “Compact server for private lorawan networks.” [En línea]. Disponible: <https://github.com/gotthardp/lorawan-server>
- [2] Davis Instruments, “Instrumentos Meteorologicos.” [En línea]. Disponible: <https://www.meteo.cc/mediafiles/PDF/Davis-2005-catalog-spanish.pdf>
- [3] J. F. Reyes Coellar y E. M. Tene Guamán, “Diseño de la arquitectura para transmisión de datos de los sensores de campo del PROMAS,” 2014. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/20911>
- [4] M. P. Gutama Morocho y J. J. Vázquez Patiño, “Prototipo de un dispositivo de adquisición, almacenamiento y transmisión de datos meteorológicos usando los transductores de la estación DAVIS 6162 Wireless Vantage Pro2 Plu,” 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28600>
- [5] Universidad de Cuenca, “Misión y Visión del Programa para el Manejo del Agua y del Suelo (PROMAS),” p. 1, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.ucuenca.edu.ec/contactos/110-cat-investigacion/cat-unidades-investig/cat-promas/379-sobre-el-promas-post>
- [6] C. Felipe, V. Jaime, V. Pablo, y C. E. PROMAS, “Artificial neural networks applied to flow prediction scenarios in Tomebamba River-Paute watershed, for flood and water quality control and management at City of Cuenca Ecuador,” in *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2013.
- [7] J. Guaman, F. Astudillo-Salinas, A. Vazquez, L. I. Minchala, y S. Placencia, “Water level monitoring system based on lora technology and lopy4 microcontroller,” pp. 1–6, 2016.
- [8] Pycom Lopy, “Adafruit Industries, electrónica y kits de bricolaje únicos y divertidos,” p. 1, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.adafruit.com/product/3339>
- [9] A. Lavric y V. Popa, “A LoRaWAN: Long range wide area networks study,” in *2017 International Conference on Electromechanical and Power Systems (SIELMEN)*. IEEE, oct 2017, pp. 417–420.



- [10] T. H. Konstantin Mikhaylov, Juha Petäjälä, “Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology,” in *2016, European Wireless*, Ed. Oulu: University of Oulu, 2016, p. 6.
- [11] T. L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, “Long-range IoT technologies: the dawn of LoRa,” 2015.
- [12] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, y M. Pettissalo, “On the coverage of LPWANs: range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology,” in *2015 14th International Conference on ITS Telecommunications (ITST)*. IEEE, dec 2015, pp. 55–59.
- [13] P. go invent, “The LoPy4,” p. 1, 2018. [En línea]. Disponible: <https://pycom.io/product/lopy4/>
- [14] Julia Slingo, “La evolución de la ciencia del clima La visión personal de Julia Slingo | Organización Meteorológica Mundial.” [En línea]. Disponible: <https://public.wmo.int/es/resources/bulletin/la-evolucion-de-la-ciencia-del-clima-la-vision-personal-de-julia-slingo>
- [15] Wireless Vantage Pro2, “Wireless Vantage Pro2™ with 24-Hour Fan Aspirated Radiation Shield | Davis Instruments.” [En línea]. Disponible: <https://www.davisnet.com/product/wireless-vantage-pro2-with-24-hour-fan-aspirated-radiation-shield/>
- [16] P. E. Avila Campos, “Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricas con LoRaWAN en ambientes forestales,” 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28504>
- [17] J. Petäjälä, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, y J. Iinatti, “Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, num. 3, 2017. [En línea]. Disponible: <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfi-fe201703225357.pdf>
- [18] E. M. T. Wedt, “A benchmark survey of long range (LoRa™) spread-spectrum-communication at 2.45 GHz for safety applications - Semantic Scholar,” *And Industrial Eng.*, num. University of Applied Sciences Offenburg, 2015. [En línea]. Disponible: [https://www.semanticscholar.org/paper/A-benchmark-survey-of-long-range-\(LoRaTM\)-at-2.45-Wendt-Volk/0317f9c164652aa06429d40d26b19aaeac76b46](https://www.semanticscholar.org/paper/A-benchmark-survey-of-long-range-(LoRaTM)-at-2.45-Wendt-Volk/0317f9c164652aa06429d40d26b19aaeac76b46)
- [19] K. Menon, D. P. y M. Ramesh, “Wireless sensor network for river water quality monitoring in India,” in *2012 Third International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT'12)*. IEEE, jul 2012, pp. 1–7.
- [20] D. He y L.-X. Zhang, “The water quality monitoring system based on WSN,” in *2012 2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications*



- and Networks (CECNet)*. IEEE, apr 2012, pp. 3661–3664. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6201666/>
- [21] C. Yamith y B. Ordoñez, “IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE SENSORES INALAMBRICOS LPWAN MEDIANTE MODULOS LoRa PARA EL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN 2 RIOS,” 2017.
- [22] E. Jose, “Análisis y diseño de una red de sensores en un parque natural.” [En línea]. Disponible: <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/59925/3/ecordobapTFG0117mem{ò}ria.pdf>
- [23] D. Javier y P. Sandoval, “Diseño de un sistema de comunicación para la transmisión de datos en tiempo real entre tres estaciones meteorológicas ubicadas en el volcán antisana y el instituto nacional de meteorología en hidrológica, en Quito.” 2011. [En línea]. Disponible: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4331/1/CD-3940.pdf>
- [24] H. Soy, Y. Dilay, y S. Koçer, “A LoRa-based Low Power Wide Area Network Application for Agricultural Weather Monitoring,” *International Journal of Science and Engineering Investigations*, vol. 6, num. 71, 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.ijsei.com/papers/ijsei-67117-25.pdf>
- [25] H. T. Reda, P. T. Daely, J. Kharel, y S. Y. Shin, “On the Application of IoT: Meteorological Information Display System Based on LoRa Wireless Communication,” *IETE Technical Review*, vol. 35, num. 3, pp. 256–265, may 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02564602.2017.1279988>
- [26] GitHub, “Cayenne low power payload.” [En línea]. Disponible: <https://github.com/myDevicesIoT/cayenne-docs/blob/master/docs/LORA.md>
- [27] Lopy Spec sheet, “Pycom Documentation,” 2018. [En línea]. Disponible: <https://docs.pycom.io/chapter/datasheets/>
- [28] J. Narvaez y B. Tenesaca, “Implementation of GSM / GRMS at the gateway using LoRaWAN protocol.” [En línea]. Disponible: <https://github.com/dastudillo1983/LoRaWANUC.git>
- [29] El Universo, “Ecuador registra temperaturas récord por el cambio climático | Ecología | Vida y Estilo | El Universo.” [En línea]. Disponible: <https://www.eluniverso.com/2010/02/28/1/1430/ecuador-registra-temperaturas-record-cambio-climatico.html>
- [30] Extra, “Intenso frío congela a los cuencanos.” [En línea]. Disponible: <http://www.extra.ec/actualidad/cuenca-clima-frio-inamhi-carreteras-JD1588957>
- [31] Geografía Infinita, “Las temperaturas más bajas y más altas registradas en cada país del mundo - Geografía Infinita.” [En línea]. Disponible: <https://www.geografiainfinita.com/2015/07/la-temperaturas-mas-bajas-y-mas-altas-registradas-en-cada-pais-del-mundo/>



- [32] Copyright, “Las 9 temperaturas más BAJAS registradas en la TIERRA... - Para Los Curiosos.” [En línea]. Disponible: <https://www.paraloscurosos.com/a13025/las-9-temperaturas-mas-bajas-registradas-en-la-tierra>
- [33] Tiempo, “Posible record mundial de humedad relativa más baja - Revista del Aficionado a la Meteorología.” [En línea]. Disponible: <https://www.tiempo.com/ram/345032/posible-record-mundial-humedad-relativa-mas-baja/>
- [34] El Mercantil, “La humedad relativa mensual en diferentes climas - Levante-EMV.” [En línea]. Disponible: <https://www.levante-emv.com/opinion/2016/10/16/humedad-relativa-mensual-diferentes-climas/1479982.html>
- [35] Agencia Espacial Civil Ecuatoriana, “Estación Climatológica Cuenca - EXA.” [En línea]. Disponible: <http://cue.exa.ec/>
- [36] El Comercio, “La velocidad de los vientos en Quito superó los 50 km/h | El Comercio.” [En línea]. Disponible: <http://www.elcomercio.com/actualidad/velocidad-vientos-quito-clima-verano-problemas.html>
- [37] Xatakaciencia, “La máxima velocidad del viento registrada, la temperatura más baja y otros récords meteorológicos.” [En línea]. Disponible: <https://www.xatakaciencia.com/medio-ambiente/la-maxima-velocidad-del-viento-registrada-la-temperatura-mas-baja-y-otros-records-met>
- [38] F. J. Martín-Gil, P. Martín-Ramos, y J. Martín-Gil, “A cryptogram in the compass roses of the Majorcan portolan charts from the Messina-Naples mapmakers school,” *Almogaren*, vol. 36, pp. 285–295, 2005.
- [39] Arizona University, “World Meteorological Organization’s World Weather & Climate Extremes Archive.” [En línea]. Disponible: <https://wmo.asu.edu/>
- [40] M. Kottek, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, y F. Rubel, “World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” vol. 15, num. 3, pp. 259–263, 2006. [En línea]. Disponible: <http://gpcc.dwd.de>
- [41] ClimateData, “Clima Ecuador: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Ecuador.” [En línea]. Disponible: <https://es.climate-data.org/location/719640/>
- [42] 20minutos, “El país con mayor radiación solar del mundo, en niveles históricos.” [En línea]. Disponible: <https://www.20minutos.es/noticia/2643977/0/peru/pais-mayor-radicacion-sol/maximos-historicos/>
- [43] Agencia Espacial Civil Ecuatoriana1, “EXA - MONITOR NACIONAL DE RADIACION ULTRAVIOLETA.” [En línea]. Disponible: <http://uv.exa.ec/>



- [44] Eltiempodelosaficionados, “RÉCORDS METEOROLÓGICOS DEL MUNDO.” [En línea].  
Disponible: <http://www.eltiempodelosaficionados.com/RECORDS.html>
- [45] Iner, “Instituto Nacional de Eficiencia Energetica y Energia Renovables.” [En línea].  
Disponible: [www.iner.gob.ec](http://www.iner.gob.ec)
- [46] L. Casals, B. Mir, R. Vidal, y C. Gomez, “Modeling the energy performance of lorawan.”  
Multidisciplinary Digital Publishing Institute, apr 2017, pp. 2360–2364.